

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
BIBLIOTECA CENTRAL

Lima, 18 de enero de 1966.

Señor Ingeniero
Marcos Alegre V.
Catedrático Secretario Interino de la
Facultad de Ingenieria Mecánica y Eléctrica.

Señor:

Por la presente, comunico a usted que el señor Dn. HUMBERTO
EDUARDO ZOLEZZI CHACON, no adeuda libros a esta Biblioteca.

Constancia que dejo ante usted, para los fines que crea con-
veniente.

I N T R O D U C C I O N

la Ingeniería Eléctrica se ha visto revitalizada tanto en su parte teórica como práctica con el advenimiento de nuevos enfoques dentro de la teoría de las máquinas rotativas y con el empleo de las calculadoras digitales. El concepto de máquinas generalizada previsto y utilizado, aunque en forma un tanto restringida, por el excelente Ingeniero Gabriel Kron, es hoy en día tratado en forma extensa en la mayoría de textos sobre máquinas eléctricas; su empleo se hace cada vez más imperioso para un buen conocimiento de máquinas en su principio de funcionamiento y en su construcción.

Uno de los principales problemas que indujeron a los Ingenieros a pensar en un mejor desarrollo de la teoría de máquinas rotativas fue el poder predecir su comportamiento en situaciones dinámicas, esto es, fuera de su estado estacionario. La mayor dificultad que se encontraba era el poder analizar circuitos eléctricos y magnéticos que se encontraban en movimiento unos respecto a otros, siendo este movimiento acelerado en el caso dinámico. Ya Park se dió cuenta de este escollo al proponer sus transformaciones de variables de tal manera de referir estas a un sistema coordinado rotativo en lugar de uno estacionario. Gabriel Kron, fue un poco más lejos, pensó que tanto los circuitos estáticos como aquellos en movimiento se podían expresar como las imágenes (proyecciones respecto a un sistema de ejes determinado) de un solo circuito general, al que llamó circuito primitivo, este circuito primitivo es la piedra angular del concepto de máquina generalizada.

Después de los trabajos de Gabriel Kron, diversos autores han perfeccionado y sistematizado la teoría de máquinas rotativas bajo la idea de má

quina generalizada, estos trabajos continúan en la actualidad en forma más profunda con el propósito de estandarizar y mejorar sus métodos.

dentro de la ingeniería una de las partes más importantes es la obtención de valores numéricos en cualquier problema específico. Son los valores numéricos los que nos permitirán juzgar si un determinado diseño es correcto o en mejorar en lo posible otro ya determinado. Pero en éste como en cualquier otro problema siempre se ha tropezado con dificultades En este caso la mayor dificultad reside en la gran cantidad de operaciones que se requiere para resolver ciertos problemas, el tiempo que se emplea en ellos y la precisión requerida. Una vez más el ingenio humano ha superado toda traba. El perfeccionamiento de medios automáticos para la realización de los cálculos numéricos ha disipado hoy en día casi por completo esta dificultad. Estos dispositivos no solo han mejorado los sistemas de cálculo, sino más aún, su empleo, requiere profundizar en determinado problema, tomando conciencia de la influencia de todos los factores involucrados y visualizando así mejores métodos de cálculo.

Uno de los problemas en ingeniería eléctrica que es típico ejemplo de la necesidad de los dos aspectos expuestos anteriormente es el problema de la estabilidad de los sistemas de potencia; en él conjugan en una forma perfecta la teoría de las máquinas rotativas en su aspecto dinámico y la necesidad de una cantidad bastante apreciable de cálculos numéricos.

proposito de este trabajo es presentar la utilización de calculadoras digitales en problemas de estabilidad transitoria de los sistemas de potencia. Con esta finalidad se ha utilizado las conclusiones de un trabajo realizado por el Ing. S. Chumpitáz que comprende la teoría de la maquina síncrona, utilizando el concepto de maquina generalizada. En este trabajo se llega a determinar el comportamiento de éstas en el estado transitorio especificamente, siendo este estado el que interesa en particular en los problemas de estabilidad transitoria.

Como resultado de este trabajo se llega a especificar la correcta representación de las maquinas síncronas en problemas de estabilidad, resumiéndose las posibles asunciones que se pueden hacer sin incurrir en errores graves con el proposito de facilitar la solución general del problema.

Tomando como base las conclusiones del trabajo señalado se desarrolla aquí de una manera sistemática el proceso del cálculo numérico de los problemas de estabilidad, llegándose a la estructuración de los programas a utilizarse en el sistema de procesamiento de datos IBM 1620 que posee la Universidad Nacional de Ingeniería. Estos programas están escritos en lenguaje Fortran y por supuesto podrán ser utilizados en cualquier otro tipo de maquina que maneje este lenguaje quizas con pequeñas modificaciones. En la parte final del trabajo se presenta una serie de ejemplos de utilización de los programas desarrollados. Su número no es grande, pero muestran perfectamente los alcances de los programas en el tratamiento de los problemas de estabi-

lidad y en otra gran variedad de trabajos en sistemas de potencia.

Quisiera indicar aquí, que cuando en este trabajo se haga referencia a la primera parte , se quiere indicar que se trata del trabajo sobre maquinas del Ing. S. Chumpitaz.

Antes de finalizar esta corta introducción quisiera mostrar mi profundo agradecimiento a todo el personal docente de la Facultad de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica, en especial a los del Departamento de Electricidad y del Laboratorio de Matemáticas por el ambiente y facilidades de trabajo encontradas.

E. Zolezzi

I N D I C E

	Pag.
-Introduccion	1
-Generalidades	5
-Las ecuaciones diferenciales de oscilacion	7
-Suposiciones sobre los parametros de las ecuaciones diferenciales de oscilacion	19
-Calculo de las potencias sincronas de entrada a un sistema	22
-Perturbaciones en los sistemas de potencia, desde el punto de vista de la estabilidad	28
-Aspectos teorico-practicos de los programas desarrollados	
-Programa para reducir una red. Metodo matricial	
-Programa para reducir una red. Metodo clasico de conversion estrella-malla	38
-Programa para calcular las admitancias equivalentes de fallas	42
-Programa para calcular el flujo de potencia en una red	47
-Programa para calcular la curva de oscilacion de una maquina sincrona	56
-Programa para calcular las curvas de oscilacion de un conjunto de maquinas sincronas	62
-Posibilidades y alcances de los programas	64
-Ejemplos	79
-Conclusiones	116
-Bibliografia	118

GENERALIDADES.-

Cuando una máquina síncrona suministra energía a una determinada red, la potencia eléctrica entregada por ésta es una función de la posición angular del rotor respecto a un eje que rota con la velocidad síncrona (como se vió en los capítulos anteriores).

Esta curva conocida con el nombre de "curva potencia-ángulo depende de varios factores, tanto de la máquina como otros de la red externa. En el estado estacionario la potencia mecánica entregada por el motor primo disminuida de las pérdidas tanto mecánicas como eléctricas en el complejo motor primogenerador es igual a la potencia eléctrica en los bornes de la máquina que suministrada a la red, y en la curva potencia - ángulo corresponde a un punto bien determinado. Si en estas circunstancias sucede una súbita variación de la potencia eléctrica que la máquina debe entregar a la red, ya sea por un aumento o disminución de la carga una variación de la estructura de la red, o una falla; la máquina se encontrará en un estado dinámico debido al desequilibrio bajo de las potencias de entrada y de salida.

El rotor del generador tratará entonces de lograr una nueva posición angular que le asegure el suministro de energía a los nuevos requerimientos. En caso de aumento de la potencia eléctrica de salida, la máquina tenderá a disminuir su velocidad sacrificando parte de su energía cinética almacenada en aras de la potencia eléctrica exigida, aumentando de esta manera el ángulo de desplazamiento del rotor. Una vez que la posición del rotor ha alcanzado el punto de la curva potencia - ángulo correspondiente a la potencia eléctrica exigida, la máquina debería estar en su posición de equilibrio, pero a causa de la inercia de su masa en rotación, está seguirá disminuyendo su velocidad y por consiguiente aumentando el ángulo de desplazamiento entre-

gando ahora mas potencia de la que necesita la red, originándose entonces un torque acelerante que aumenta la velocidad de la máquina.

Se da origen así a oscilaciones pendulares de la máquina alrededor de su nueva posición de equilibrio. Estas oscilaciones se irán amortiguando más o menos rápidamente dependiendo de los factores que consuman energía (rozamiento, bobinados amortiguadores, etc) y la acción del regulador de velocidad.

Puede darse el caso sin embargo, una vez pasado el punto de equilibrio y la velocidad de la máquina siga disminuyendo a causa de su inercia, aumentando el ángulo de desplazamiento que, el torque acelerante que aparece no sea suficientemente elevado para restaurar el rotor a su nueva posición de equilibrio y entonces el ángulo crezca indefinidamente dando origen a la salida de paso de la máquina.

El conocimiento de la posición angular del rotor respecto del tiempo nos permitirá juzgar bajo que circunstancias la máquina puede conservar el sincronismo o en que otras lo perderá. Específicamente, la curva angulo-tiempo nos permitirá diseñar una red que sea estable bajo determinadas condiciones de perturbación, o, saber si un sistema ya diseñado soportará ciertas fallas sin perder el sincronismo.

Destacar la importancia de la curva angulo-tiempo (conocida con el nombre de curva de oscilación) es redundante. Su importancia es evidente, pues ella nos da los criterios necesarios para poder emitir un juicio en lo que se refiere a la estabilidad de una máquina.

El trazado de la curva de oscilación para una máquina no es un problema fácil, se vio en el capítulo referente a máquinas sincronicas que la curva potencia angulo, en el caso transitorio es compleja por la serie de factores que intervienen que son funciones de la posición angular de la máquina. Como se dijo y se verá más adelante, ciertas simplificaciones son necesarias

para una solución práctica del problema.

En los párrafos anteriores hemos tomado como ejemplo para facilitar la exposición, el caso de una sola máquina trabajando en una red. Normalmente los sistemas de potencia contienen una cantidad bastante apreciable de máquinas que suministran energía a la red en este caso es necesario el conocimiento de todas las curvas de oscilación de las máquinas para poder saber si una o un conjunto de ellas pierden el paso cuando sucede una perturbación. El problema se hace ahora muchísimo más complicado que para el caso de una sola máquina. Las potencias en este caso fluyen de una o varias máquinas al otro conjunto de máquinas y las expresiones de las potencias eléctricas de salida dependerán tanto de la posición angular de la propia máquina como del resto de máquinas que se hallan conectadas a la red y por supuesto de la estructura de la red. Ya se vió en el capítulo de máquinas las expresiones de las potencias en función de los ángulos y de las tensiones internas de las máquinas y se pudo apreciar su complejidad. La solución será en este caso, la resolución de las ecuaciones simultáneamente y para cada máquina. Esto se desarrollará más adelante.

LAS ECUACIONES DIFERENCIALES DE OSCILACION.-

La ecuación dinámica de una masa en rotación está dada por:

$$I \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_a \quad (1)$$

donde:

I = Momento de Inercia de la masa

θ = Ángulo respecto a un eje de referencia fijo

$T =$ Torque acelerante.

El torque T_a es la suma algebraica de todos los torques aplicados a la masa.

En el caso de un generador, el torque acelerante estará dado por el torque mecánico T_m aplicado en el eje por el motor primo (disminuida de las

pérdidas Mecánicas) menos el torque electromagnético en el entrehierro T_e . Luego :

$$T_a = T_M - T_e$$

En los problemas de estabilidad es mas conveniente trabajar con el ángulo δ que forma el eje de referencia del rotor (eje directo) con un eje ficticio que rota con la velocidad síncrona en dirección del campo, en vez de trabajar con el ángulo real θ respecto a un eje fijo.

Si llamamos ω_s a la velocidad síncrona, entonces:

$$\delta = \theta - \omega_s t \quad (2)$$

Y será:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_s \quad (3)$$

y:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (4)$$

Y LA ECUACION DINAMICA QUEDARA.-

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = I \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_M - T_e \quad (5)$$

multiplicamos ambos miembros de la ecuación por ω , siendo ω la velocidad Real del rotor, se tendrá:

$$\omega I \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega T_M - \omega T_e \quad (6)$$

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (7)$$

donde:

$\omega I = M$ = Momento angular
 $\omega T_M = P_m$ = Potencia Mecánica en el eje. Corregida de las pérdidas.

$\omega T_e = P_e$ Potencia eléctrica de salida corregida de las pérdidas.

Prestemos atención a la ecuación (7) conocida con el nombre de "ecuación diferencial de oscilación". En esta ecuación el momento angular M no es constante sino función de la velocidad ω del rotor. P_m tampoco es constante porque depende también de la velocidad en lo que se refiere a las pérdidas mecánicas incluidas y finalmente P_e es una función mas o menos complicada de δ y de las características del generador y de la red como se vió en la parte correspondiente a máquinas generalizada.

En el caso de un sistema con varias máquinas habrá una ecuación similar a (7) para cada máquina presentes en el sistema. Se puede poner entonces:

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{m_1} - P_{e_1}$$

Y en general :

$$M_n \frac{d^2 \delta_n}{dt^2} = P_{m_n} - P_{e_n} \quad (8)$$

Y ahora las potencias eléctricas de salida P_{e_i} son funciones de los ángulos $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ y de las características de las máquinas y del sistema eléctrico.

Las ecuaciones (8) y en particular la ecuación (7) serán las ecuaciones que definan el estado dinámico de las máquinas (o máquina) en el momento subsecuente a una perturbación. En el estado estacionario $\omega = \omega_s$ y $P_{m_n} = P_{e_n}$ y no existe un estado dinámico del sistema. La solución simultánea de estas ecuaciones (o ecuación) nos dará la posición angular de cada máquina respecto al tiempo o la llamada "Curva de oscilación" para cada máquina.

Existen varios métodos de solución de estas ecuaciones entre los más conocidos:

Destacan los métodos gráficos y los métodos numéricos.

En los métodos gráficos se encuentra el de "Igualdad de áreas" (Ver Bibliografía) usado frecuentemente en los problemas donde intervienen una o dos máquinas. Debido a que en el caso de más de dos máquinas las ecuaciones que ligan a P_{ei} son funciones de varios ángulos (del resto de máquinas) la aplicación de este método no es posible. Los métodos numéricos de primera instancia tienen ya una ventaja sobre los métodos gráficos y es su aplicabilidad a sistemas con más de dos máquinas. La exactitud de los cálculos es otra de las ventajas que ofrecen los métodos numéricos sobre los métodos gráficos. Cabe sin embargo objetar a los métodos numéricos la gran laboriosidad en los cálculos.

El uso relativamente reciente de las calculadoras digitales ha venido a subsanar esta deficiencia de los métodos numéricos en Ingeniería. Su gran rapidez y su capacidad de manejar grandes cantidades de datos y realizar gran número de operaciones facilita enormemente los cálculos numéricos. Un caso típico de estos problemas es el cálculo de las curvas de oscilación de las máquinas síncronas conectadas a una red el hecho de que el sistema esté regido por un conjunto de ecuaciones diferenciales simultáneas, señala ya la aplicación de métodos numéricos para su solución.

El tipo de ecuaciones (8) tiene dos métodos normales para su resolución numérica. Estos son : el método de Rugge - Kutta y el método paso a paso (Step - By Step).

El método de Rugge - Kutta lleva a una solución más exacta y algunas veces con menos cálculos que el método paso a paso, (Ver: The solution of Power System Stability Problems By Means of Digital Computers. D. C. Johnson y J.B. Ward Trans. AIEE - 1957), sin embargo el método paso a paso es más utilizado y se aplica correctamente, su exactitud es comparable al método de Rugge-Ku-

ta y el número de operaciones es menor en la mayoría de los casos.

Por estos motivos en este trabajo se utilizará el método paso a paso para cálculo digital de las curvas de oscilación.

El Método paso a paso para la solución de las ecuaciones de oscilación.-

Este método es muy conocido en la solución de ecuaciones diferenciales. En esencia el método consiste en suponer la constancia de una ó más variables durante un período de tiempo pequeño, o en otro caso suponer una cierta relación, funciones entre dos variables (o más) que intervienen en la ecuación, también en un tiempo pequeño. Con esta suposición se resuelve la ecuación(o ecuaciones) para el final del período, con el conocimiento de los valores al inicio del período (condiciones iniciales). Se recalcula ahora la variable (o variables) supuesta constante (o función) para estos nuevos valores utilizándose nuevamente en el cálculo de otro punto. Se sigue así sucesivamente obteniéndose la curva punto a punto.

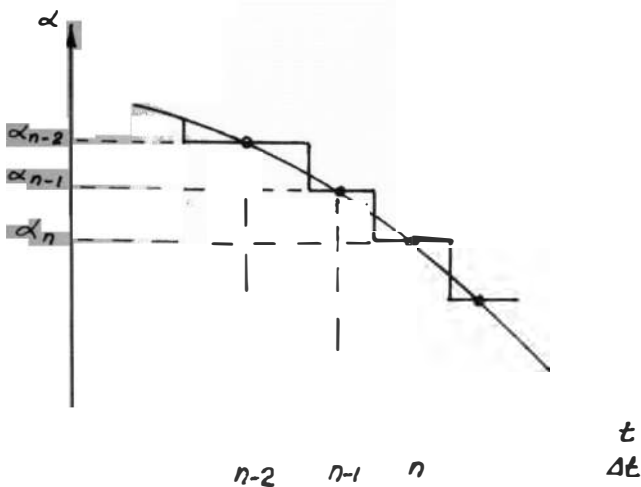
Si observamos la ecuación de oscilación (7) es inmediato que la variable mas apropiada para asumir su constancia es la potencia acelerante pues esto nos lleva a resolver una ecuación diferencial simple de segundo orden (con la suposición que M se mantiene constante). Esta suposición es la más justa y utilizada normalmente en los cálculos numéricos de ecuaciones diferenciales.

Una vez hecha la suposición de la constancia de la potencia acelerante durante un pequeño intervalo de tiempo procedemos a una solución analítica de la ecuación, obteniéndose δ y ω al final del intervalo. Con estos valores de δ y ω recalculamos M y $P_a = P_m - P_e$ y con ellos se vuelve a calcular δ y ω manteniendo constantes M y P_a para este período. P_m se recalculará con la relación que ligue las pérdidas mecá-

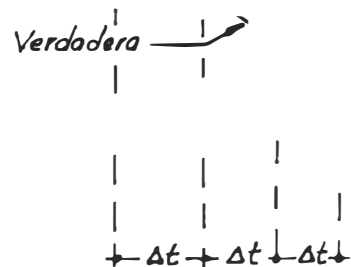
nicas con la velocidad y la potencia mecánica entregada en el eje controlada por el regulador de velocidad. P_e se calculará resolviendo la red para los nuevos valores de d y ω .

Resumiendo el método paso a paso consiste de 2 fases fundamentales que se llevan a cabo alternativamente. La primera fase consiste en el cálculo de las posiciones angulares y las velocidades al final de un intervalo conociendo los valores al inicio del intervalo resolviendo la ecuación diferencial con la suposición asumida. La segunda fase es el cálculo de P_a y M_s con los valores hallados anteriormente por la solución de la red y el cálculo en la máquina síncrona.

Surge ahora una pregunta y es aquella de saber ¿en qué punto del intervalo o mejor dicho desde que punto hasta que punto se considera la potencia a celerante y ω constantes? en este caso tenemos dos alternativas y son: primero, suponer la potencia constante desde la mitad del período anterior hasta la mitad del período posterior; al punto considerado; y segundo, considerar constante desde el punto considerado hasta el final del período. La figura 1 muestra en la parte a) el primer caso y en b) el segundo caso



(a)

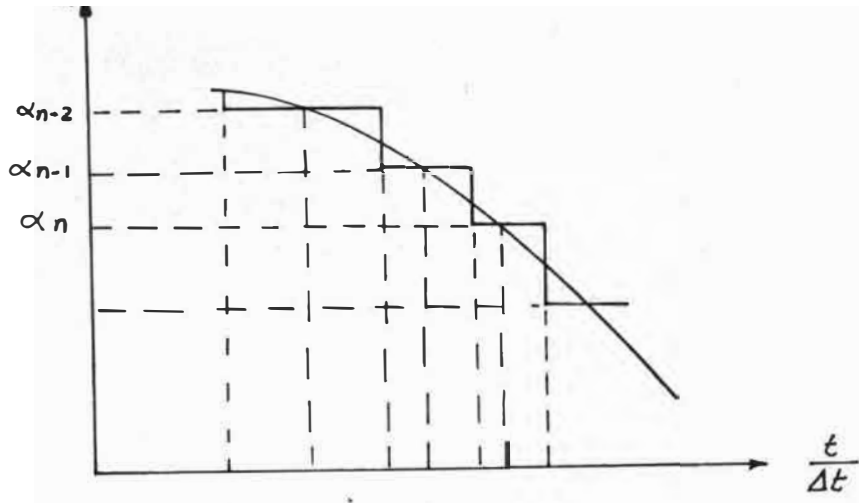


(b)

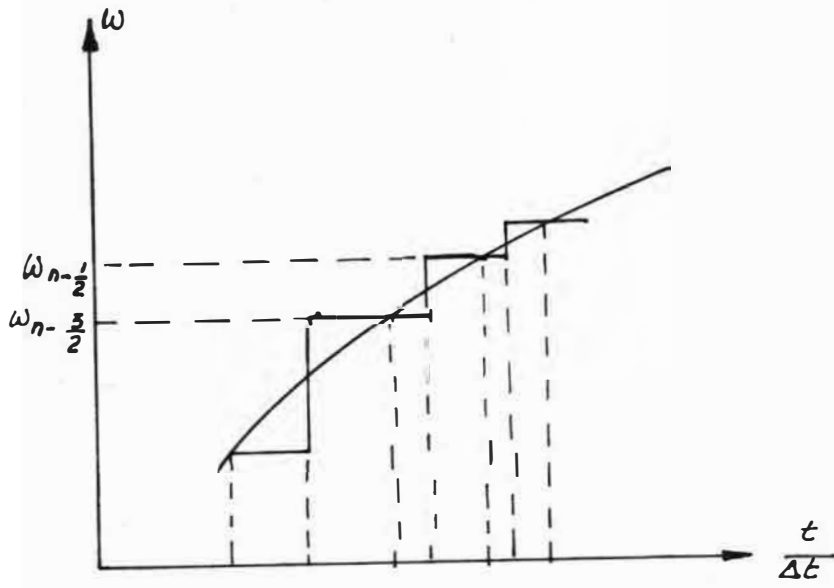
Observando la parte (b) de la figura 1 en la cual se usa P_a constante durante el período Δt e igual al valor al principio del intervalo, se nota que durante la desaceleración (caso mostrado en la figura) la aceleración supuesta es siempre mayor que la real y consecuentemente la velocidad así calculada viene a ser progresivamente mayor que la verdadera y el ángulo lógicamente mayor. En la parte de aceleración (no mostrada) comienza entonces con una amplitud (valor de \hat{d}) mayor que el real y si ningún error consecutivo sucede continuará con esta amplitud. Sin embargo la aceleración estará en aumento y la asumida es siempre mayor que la real y por lo tanto más negativa y la velocidad negativa calculada es siempre mayor en valor absoluto que el valor real; el retardo angular es entonces grande y la amplitud crece con cada oscilación desviándose de su valor real.

La primera alternativa mostrada en la parte (a) salva sin embargo esta dificultad, pues al suponer la aceleración constante desde la mitad del período anterior hasta la mitad del posterior la aceleración supuesta es justa para el punto en que se calcula P_a , disminuyendo notablemente el error de la segunda alternativa.

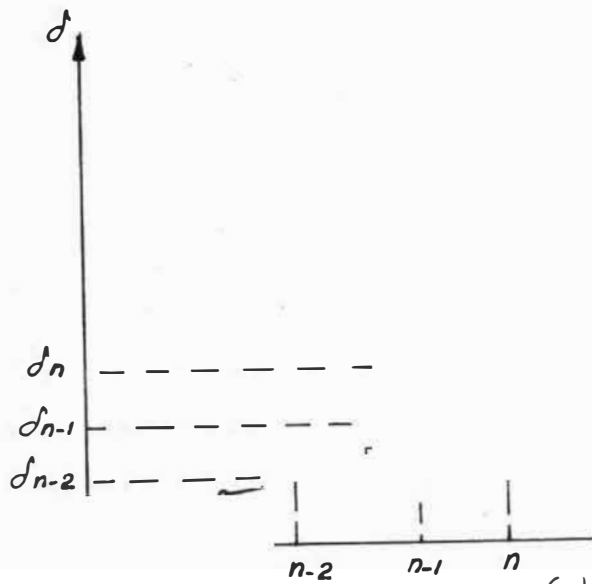
Tomaremos para nuestro desarrollo la primera alternativa, esto es, potencia acelerante constante durante un intervalo que vá desde la mitad del período anterior hasta la mitad del posterior y así consideramos que los intervalos comienzan en los puntos en los cuales se calcula la aceleración. La Figura. En sus partes (a) (b) y (c) aclaran lo dicho. Veamos gráficamente, si se considera el intervalo n -ésimo.



(a)



(b)



(c)

que comienza en $t = (n-1)\Delta t$; la posición angular en este instante es δ_{n-1} . La aceleración será α_{n-1} dada por P_a calculada para la mitad del período anterior y que se asume constante desde:

$$t = (n - \frac{3}{2}) \Delta t \quad a \quad t = (n - \frac{1}{2}) \Delta t$$

En este intervalo ocurre un cambio de velocidad que es:

$$\Delta \omega_{n-\frac{1}{2}}$$

Empleando este método vamos a dar la solución de las ecuaciones (8). Previamente a la perturbación el sistema se halla en estado estacionario y por lo tanto existe unos valores iniciales de P_a y δ que serán por supuesto Cero para P_a y unos ciertos valores de δ ; δ_1 ; δ_2 , ..., δ_n , que determinan P_e . Una vez que suceda la perturbación P_e cambiará debido al cambio en la estructura de la red y aparecerá un P_a para cada máquina; P_1, P_2, \dots, P_n ; con estos valores iniciales considerados constantes se principia el cálculo de las ecuaciones.

Vamos a emplear superíndices para indicar la máquina a la cual se refiere la ecuación, y subíndices para indicar los puntos donde se calcula.

$$\begin{aligned} M_0^1 \frac{d^2 \delta_1^1}{dt^2} &= P_{a0}^1 \\ \dots &= \dots \\ M_0^n \frac{d^2 \delta_1^n}{dt^2} &= P_{a0}^n \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (9)$$

Integrando Considerando ω_0 y P_{a0} Constante

$$\begin{aligned} M_0^1 \frac{d \delta_1^1}{dt} &= M_0^1 \omega_1^1 \quad \omega_0^1 + P_{a0}^1 t \\ M_0^2 \frac{d \delta_1^2}{dt} &= M_0^2 \omega_1^2 \quad \omega_0^2 + P_{a0}^2 t \quad \dots \dots \dots (10) \\ \dots &= \dots \\ M_0^n \frac{d \delta_1^n}{dt} &= M_0^n \omega_1^n \quad \omega_0^n + P_{a0}^n t \end{aligned}$$

e integrando una vez más y dividiendo por M_0^i cada ecuación obtenemos:

$$\mathcal{J}_1^i = \mathcal{J}_0^i + \omega_0^i t + \frac{P_{a0}^i t^2}{2M_0^i} \quad (11)$$

En general para la máquina i .

Si consideramos en general el n - esimo período entonces las ecuaciones (10) y (11) escritas para la máquina serán:

$$\omega_{n-\frac{1}{2}}^i = \omega_{n-\frac{3}{2}}^i + \frac{\Delta t}{M_{n-\frac{1}{2}}^i} P_{a(n-1)}^i \quad (12)$$

$$\mathcal{J}_n^i = \mathcal{J}_{n-1}^i + \omega_{n-\frac{3}{2}}^i \Delta t + \frac{(\Delta t)^2}{2M_{n-\frac{1}{2}}^i} P_{a(n-1)}^i \quad (13)$$

Donde se ha puesto Δt en vez de t puesto que el intervalo es Δt .

Y los incrementos en velocidad y ángulo en el n ésimo período son:

$$\Delta \omega_{n-\frac{1}{2}}^i = \omega_{n-\frac{1}{2}}^i - \omega_{n-\frac{3}{2}}^i = \frac{\Delta t}{M_{n-\frac{1}{2}}^i} P_{a(n-1)}^i \quad (14)$$

$$\Delta \mathcal{J}_n^i = \mathcal{J}_n^i - \mathcal{J}_{n-1}^i = \omega_{n-\frac{3}{2}}^i \Delta t + \frac{(\Delta t)^2}{2M_{n-\frac{1}{2}}^i} P_{a(n-1)}^i \quad (15)$$

Al suponer constante la aceleración en el intervalo la variación de la velocidad será lineal con el tiempo. Como se indicó anteriormente se vá a considerar que el cambio de velocidad ocurre como un salto en la mitad del período esto es, en $t = (n-1)\Delta t$, que es el mismo instante para el cual se ha calculado P_a , y durante los períodos es ω constante e igual al valor en $n-\frac{1}{2}$. Entonces el incremento del ángulo,

Quedará:

$$\Delta d_n^i = \Delta t \omega_{n-\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Y :

$$d_n^i = d_{n-1}^i + \Delta d_n^i \quad (17)$$

Tal como se muestra en la Figura Parte (c)

Si se quiere calcular d independientemente de ω , es posible eliminar ω de las ecuaciones (12) y (16). De (12) despejamos $\omega_{n-\frac{1}{2}}$ sustituyendo este valor en (16), y da:

$$\Delta d_n^i = \Delta t \omega_{n-\frac{1}{2}}^i + \frac{(\Delta t)^2}{M_{n-\frac{1}{2}}^i} P_a^i(n-1)$$

Pero de (16)

$$\omega_{n-\frac{1}{2}}^i = \frac{\Delta d_{n-1}^i}{\Delta t}$$

Y entonces:

$$\Delta d_n^i = \Delta d_{n-1}^i + \frac{(\Delta t)^2}{M_{n-\frac{1}{2}}^i} P_a^i(n-1) \quad (18)$$

Si se desea la velocidad, se puede obtener de

$$\omega_{n-\frac{1}{2}}^i = \frac{\Delta d_n^i}{\Delta t} \quad (19)$$

Resumiendo se tienen las siguientes ecuación para el cálculo paso a paso.

$$d_n^i = d_{n-1}^i + \Delta d_n^i$$

$$\Delta d_n^i = \Delta d_{n-1}^i + \frac{(\Delta t)^2}{M_{n-\frac{1}{2}}^i} P_a^i(n-1) \quad (20)$$

$$\omega_{n-\frac{1}{2}}^i = \frac{\Delta d_n^i}{\Delta t}$$

Por supuesto que los valores de P_a y M es necesario calcularlos para cada punto.

Antes de poner nuestra atención sobre el cálculo de la potencia acelerante es necesario resolver una cuestión de importancia. Esta se refiere a los efectos de discontinuidad en la potencia acelerante P_a , las cuales ocurren por ejemplo, cuando sucede una falla, o cualquier perturbación.

La Figura 3 aclarará nuestro razonamiento.

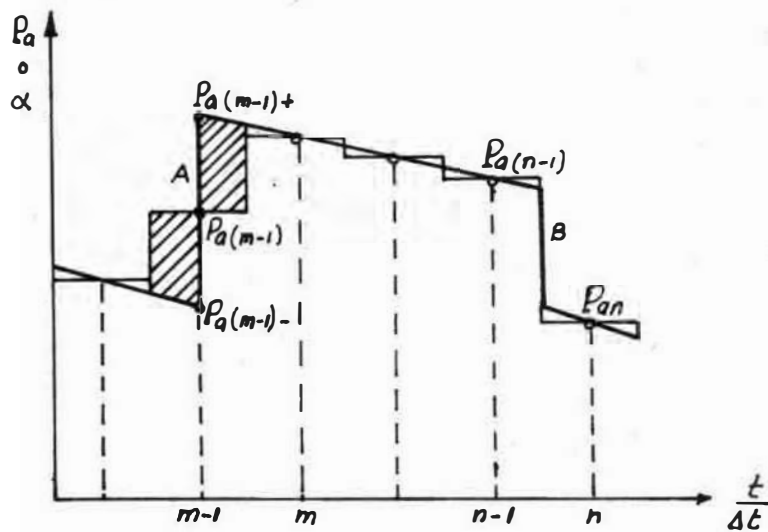


FIGURA N°3

En esta figura se ha puesto que las discontinuidades A y B suceden al principio y a la mitad de un intervalo respectivamente. Suponer que esto es siempre cierto, aunque la discontinuidad suceda en algún otro punto intermedio no lleva a error, pues los intervalos de tiempo Δt son bastante pequeños.

Si la discontinuidad sucede al comienzo de un intervalo, la potencia a usarse para el cálculo de Δf será el promedio de las potencias antes y después de la perturbación, como se ve en la figura, esto nos lleva al salto correcto en P_a en el cálculo paso a paso (función escalera indicada). Si la discontinuidad sucede en la mitad de un período, se calculará Δf usualmente con el valor de P_a al comienzo del período, pero tendrá que cambiarse para el cálculo del subsecuente Δf . La figura también aclara este

concepto. En el caso particular del momento inicial, donde la potencia P_0 antes del disturbio es cero, entonces, la potencia a usarse en el primer instante será:

$$P_{a0} = \frac{P_{a0(+)} }{2}$$

SUPOSICIONES HECHAS SOBRE LOS PARAMETROS DE LA ECUACION DIFERENCIAL EN LOS CALCULOS DE ESTABILIDAD.-

Ahora quisieramos tocar un punto de suma importancia antes de seguir adelante y, es en lo que se refiere a las asunciones que se hacen generalmente en los cálculos de las curvas de oscilación de las máquinas síncronas. Estas asunciones se refieren a los valores de los parámetros que intervienen en la ecuación diferencial de oscilación. Como se ha señalado anteriormente tomando en cuenta todos los factores que intervienen en ésta es sumamente dificultosa y aún en ciertos casos imposible.

La primera suposición y que es casi inmediata es la suposición de M , constante para cada máquina. Aunque M es función de ω , la variación de ω , respecto a la velocidad síncrona es prácticamente despreciable en problemas de estabilidad. Se han registrado máximas variaciones de M en 3% cuando el sistema ya es inestable, lo que es de suponer que durante las oscilaciones

Hay específicamente otros 4 puntos importantes que deben tomarse en consideración, los cuales afectan la ecuación de oscilación y sobre los cuales, se va a tomar ciertas asunciones.

En el cálculo punto a punto, de las curvas de oscilación se vió que era necesario el conocimiento de la potencia acelerante P_a para cada máquina al comienzo de cada período; sin el cual, la ecuación no se podía resolver. Puesto que $P_m - P_e = P_a$ tanto la potencia mecánica de entrada, como la potencia eléctrica de salida deben ser conocidas para cada máquina. Ahora bien:

a) La Potencia mecánica de entrada, dada por el motor primo está gobernada en todo momento por el regulador de velocidad de éste y por consiguiente variará toda vez que la velocidad del conjunto motor primo generador varíe. Usualmente con reguladores de velocidad no actúan hasta que el cambio en velocidad no exceda en determinado valor que depende de su sensibilidad. Aún siendo rápido en detectar la variación en velocidad, existirá un atraso en su accionar (tiempo de respuesta); lo que hace en suma desprestigiar la acción del regulador de velocidad, considerando la potencia mecánica de entrada constante durante las oscilaciones. En todo caso la acción de un regulador de velocidad bien calculado, será en un sentido tal de mejorar la estabilización de la máquina. Puede darse el caso sin embargo que el regulador perjudique la estabilidad por su acción retardada de realimentación.

Este problema escapa de nuestro trabajo, pero se puede encontrar referencias útiles en la teoría del control.

b) En la parte que se refiere a la teoría de la máquina síncrona, se vió que las expresiones de potencia eléctrica, existía un término que se refiere a una potencia de amortiguación o asíncrona, debido a la acción del generador como motor asíncrono durante las oscilaciones en que no posee la ve-

locidad síncrona.

Las potencias asíncronas dependen de las velocidades de las máquinas; y como se puede apreciar estas potencias serán pequeñas en comparación con las potencias síncronas dependientes del ángulo, debido como en el caso anterior a la poca variación de la velocidad en las oscilaciones. Y una vez más estas potencias favorecen la estabilización pues su acción tiende a restablecer al generador a su velocidad síncrona. En la primera parte del trabajo se vio como se pueden calcular estas potencias.

En cálculos refinados se puede incluir esta potencia en la deducción de la curva de oscilación, pero esto aumenta notablemente los cálculos y no lleva a una exactitud justificable. Se puede ver en la referencia que un mismo problema calculado tomando en cuenta la potencia asíncrona no difiere casi en nada con el que se calcula sin tomarla en cuenta.

c) En lo que se refiere a la potencia síncrona, ésta se calculará por la solución de la red en el determinado momento de la curva. Estrictamente la red no se halla en estado estacionario durante las oscilaciones, tanto debido a la perturbación de la red como a la sucesiva variación del ángulo de fase de cada máquina. (δ_i). Los períodos de oscilación de las máquinas son en comparación con las constantes de tiempo de la red, bastante grandes, debido a esto, la red se puede considerar en estado estacionario en cada momento en que se calcula un punto de la curva. Las máquinas se representarán adecuadamente en su estado transitorio como se indicó en la primera parte del trabajo. (ING. CHUMPITAZ)

d) La posición angular del rotor (δ) respecto al estator (relativa a una velocidad síncrona) no es justamente la posición de fase de la tensión interna de la máquina. Ya se vio en la primera parte que existe una pequeña diferencia entre uno y otro ángulo.

Sin embargo, nosotros la consideraremos idéntica y su razón es inmediata y no requiere de comentarios.

Podemos resumir entonces las consideraciones que se harán en lo que resta del trabajo:

- 1.- Potencia mecánica de entrada constante
- 2.- Potencia asíncrona despreciable
- 3.- Potencia síncrona calculada en cada punto como si la red se hallara en estado estacionario.
- 4.- Correcta representación de la máquina síncrona en la red tomando los dos casos.
 - a) Tensión constante detras de la reactancia transitoria.
 - b) Concatenaciones de flujo constante (o lo que equivale a constancia de $E'Q$).
- 5.- La acción del regulador de tensión no se tomará en cuenta.
- 6.- Angulo mecánico del rotor igual al ángulo de fase de la tensión interna.

(VER TRABAJO SOBRE MAQUINAS. INS. CHUMPITAZ)

CALCULO DE LA POTENCIA SINCRONA DE ENTRADA A UN SISTEMA

La deducción de las expresiones de las potencias sincronas de entrada a un sistema está hecha en muchos libros.

El propósito de incluirla aquí es para aclarar la deducción de las ecuaciones de potencia en los bornes de la máquina y mas específicamente las potencias interiores a cada máquina, tanto para la de polos lisos como para la de polos salientes.

Puesto que la potencia síncrona circula en la red de secuencia positiva, es esta red la que tiene importancia fundamental en los problemas de estabilidad

Se parte entonces de una red de secuencia positiva.

La Figura N°4 muestra en forma simbólica un sistema, donde los puntos de acceso son las estaciones generadoras y el punto O es tierra (se entiende por supuesto que el sistema es trifásico y lo que se muestra es la red de secuencia positiva).

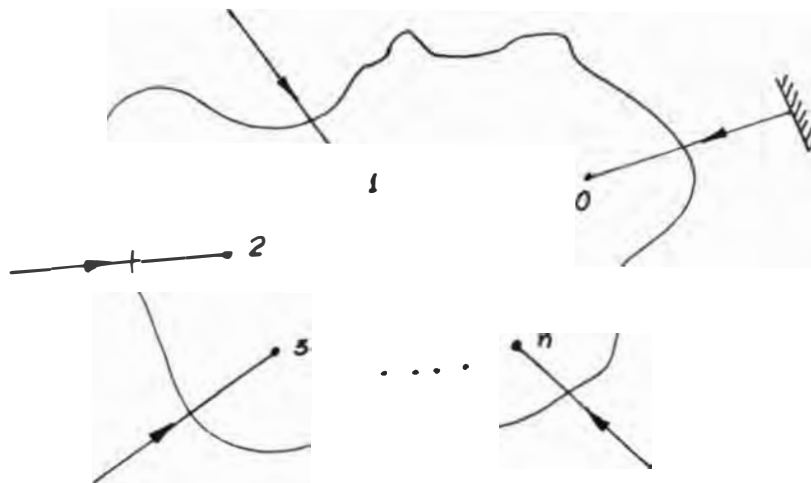


FIGURA N°4

En estas condiciones, la potencia de entrada a cada estación generadora será:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= E_1 \times \hat{I}_1 = P_1 + jQ_1 \\
 \bar{N}_2 &= \bar{E}_2 \times \hat{I}_2 = P_2 + jQ_2 \\
 &\dots \dots \dots = \dots \dots \dots \\
 N_n &= E_n \times \hat{I}_n = P_n + jQ_n
 \end{aligned}
 \quad \dots \dots \dots (24)$$

Donde las E_i son las tensiones terminales de las estaciones e I_i las corrientes de entrada.

Si representamos por $[\bar{E}]$ y por $[\bar{I}]$ los vectores columnas de las tensiones y de las corrientes respectivamente, las corrientes $[\bar{I}]$ pueden expresarse en función de las tensiones $[\bar{E}]$, aplicando la solución nodal al sistema. Así:

$$[\hat{I}] = [\hat{Y}] \cdot [\hat{E}] ; \dots \dots \dots (21)$$

Donde $[\bar{Y}]$ es la matriz cuadrada simétrica de admitancias nodales; \bar{Y}_{ik} representa la admitancia mutua del nodo i respecto al nodo k ; e Y_{ii} será la admitancia propia del nodo i . O bien, la suma de todas las admitancias que llegan al nodo i será:

Y entonces:

$$[\hat{I}] = [\hat{Y}] \cdot [\hat{E}] \dots \dots \dots (22)$$

$$\hat{I}_i = [\hat{Y}_i] \cdot [\hat{E}]$$

Donde con $[\bar{Y}_i]$ indicamos la matriz formada por la fila i de $[\bar{Y}]$

Luego

$$N_i = \bar{E}_i \cdot \hat{I}_i - \bar{E}_i \cdot [\bar{Y}_i] \cdot [\hat{E}]$$

O bien

$$\bar{N}_i = E_i \cdot \sum_{k=1}^n \hat{Y}_{ik} E_k$$

Y si ponemos

$$\bar{E}_i = E_i \underline{L} E_i \qquad \hat{E}_i = E_i \underline{L} - E_i ; \hat{Y}_{ik} = Y_{ik} \underline{L} - \beta_{ik}$$

Quedará

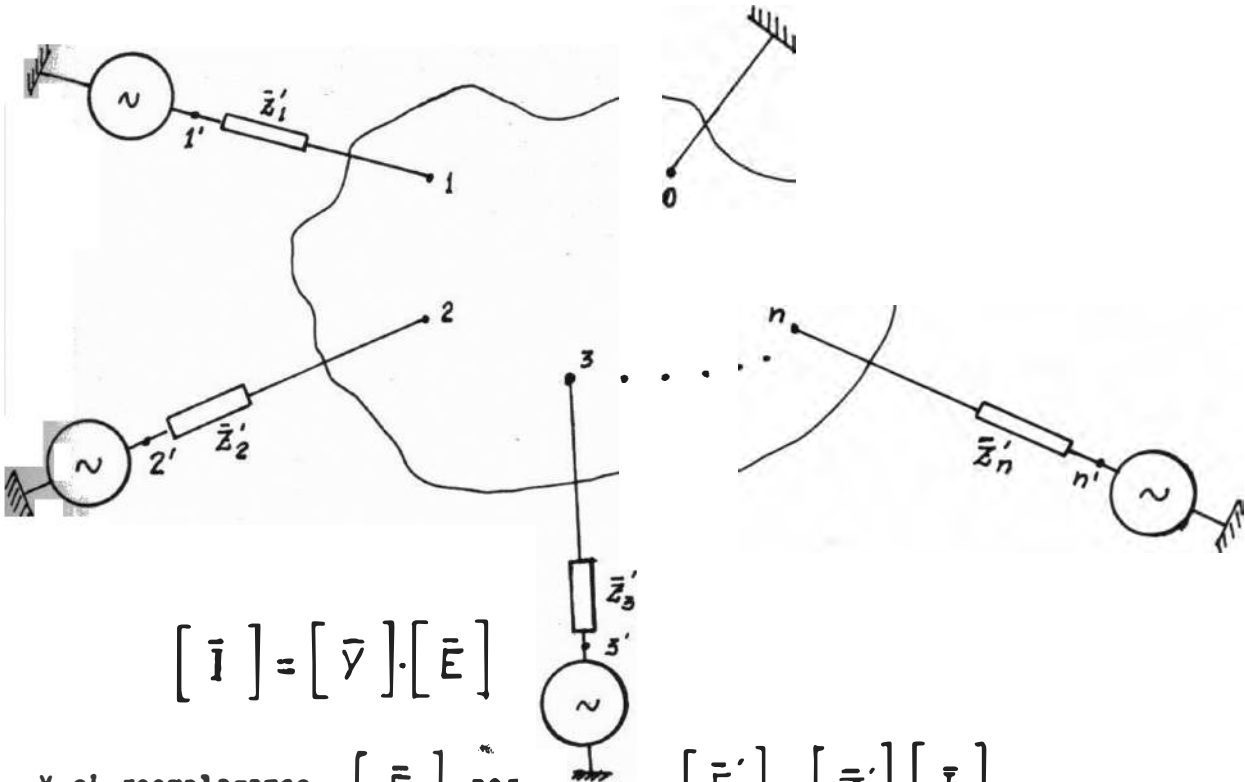
$$N_i = \sum_{k=1}^n E_i E_k Y_{ik} \underline{L} (\delta_i - \delta_k - \beta_{ik})$$

Y como:

$$P_i = N_i \cos \theta$$

$$P_i = \sum_{k=1}^n E_i E_k Y_{ik} \cos (\delta_i - \delta_k - \beta_{ik}) \dots \dots (23)$$

Si ahora incluimos las máquinas síncronas en cada estación generadora obtendremos las ecuaciones potencia ángulo para todas las máquinas. En el caso de máquinas de polos lisos y estado transitorio se podrá representar cada máquina por una impedancia en serie con una tensión detrás de la impedancia transitoria. Entonces será:



$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{E}]$$

Y si reemplazamos $[\bar{E}]$ por $[\bar{E}'] - [\bar{Z}'] \cdot [\bar{I}]$ donde $[\bar{E}']$ es la matriz de tensiones internas detrás de la impedancia transitoria y $[\bar{Z}']$ es una matriz diagonal de las impedancias transitorias. Se tendrá

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{E}'] - [\bar{Y}] \cdot [\bar{Z}'] \cdot [\bar{I}]$$

$$\left\{ [\bar{U}] + [\bar{Y}] \cdot [\bar{Z}'] \right\} \cdot [\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{E}']$$

$$[\bar{I}] = \left\{ [\bar{U}] + [\bar{Y}] \cdot [\bar{Z}'] \right\}^{-1} \cdot [\bar{Y}] \cdot [\bar{E}']$$

Y si llamamos a:

$$\left\{ [\bar{U}] + [\bar{Y}] \cdot [\bar{Z}'] \right\}^{-1} \cdot [\bar{Y}] = [\bar{Y}']$$

donde

$[\bar{y}']$ que será ahora la matriz de admittancias nodales respecto a los nodos $1', 2' \dots, n'$ se tendrá:

$$y: \quad \begin{aligned} [\bar{I}] &= [y'] [\bar{E}'] \\ [\hat{I}] &= [\hat{y}'] [\hat{E}'] \end{aligned}$$

Las potencias vectoriales serán de la misma forma que las donde se sustituye E por \bar{E}' y $[\hat{Y}]$ por $[\hat{Y}']$ y entonces poniendo:

$$\bar{E}'_i = E'_i L \delta_i ; \quad \hat{E}'_i = E'_i L - \delta_i , \quad \hat{Y}'_{ik} = Y'_{ik} L - j'_{ik}$$

quedará:

$$\bar{N}_i = \sum_{k=1}^n E'_i E'_k Y'_{ik} L \delta_i - \delta_k - j'_{ik}$$

Y:

$$P_i = \sum_{k=1}^n E'_i E'_k Y'_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k - j'_{ik}) \quad \dots (25)$$

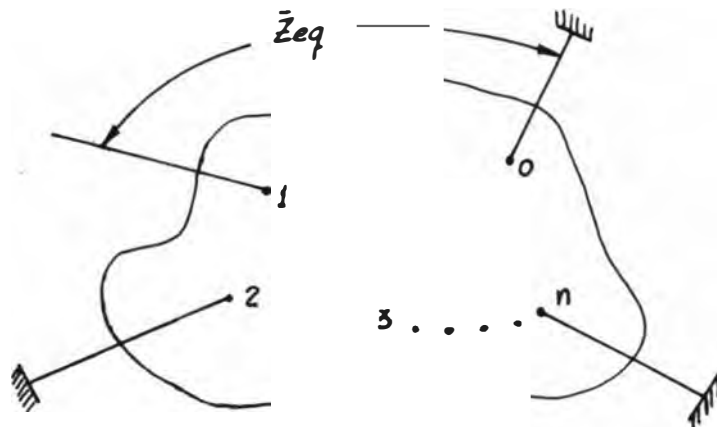
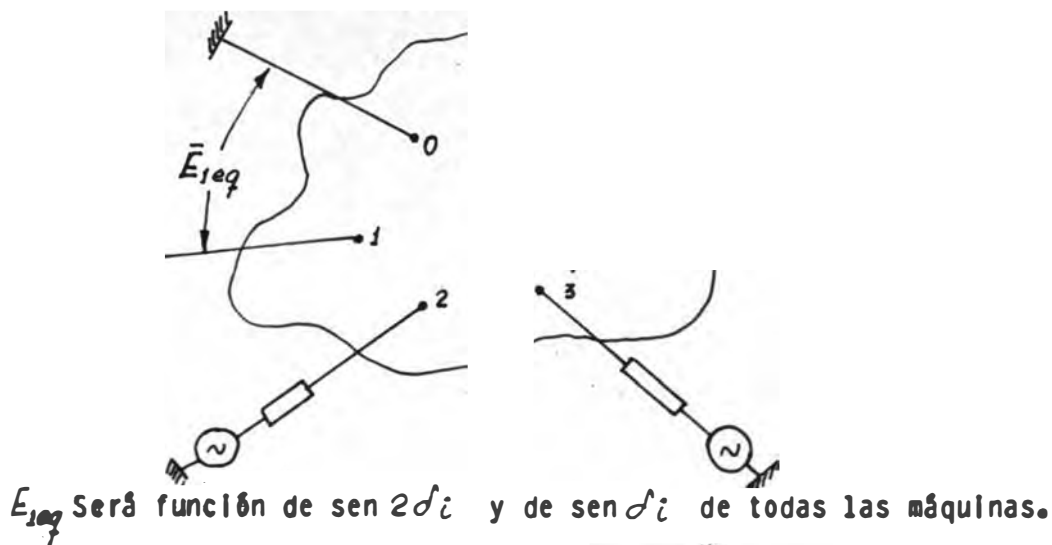
Y se tiene las ecuaciones potencia-ángulo para un sistema con máquinas de rotor cilíndrico. Se entiende que estas ecuaciones son para el caso transitorio.

En el caso de sistemas con máquinas de polos salientes la deducción de las ecuaciones potencia ángulo es mas complicada, pues debido al hecho de que la máquina ofrece diferentes reactancias en el eje directo que en el eje en cuadratura, aparecerán términos en ángulo doble. La potencia en este caso debe calcularse de:

$$P = E_d I_d + E_q I_q$$

Se puede obtener una ecuación de potencia para la máquina 1 si se reemplaza el circuito externo a los bornes de la máquina por un circuito *THEVENIN* equivalente, de donde se obtiene E_{ideq} y E_{iqeq} que se sustituirán en las ecuaciones Δ y θ deducidas en el trabajo sobre máquinas síncronas. La resistencia y la reactancia equivalentes se sumarán a las r y X'_q respectivamente que aparecen en las ecuaciones.

La figura aclara el Concepto.



será función de X'_{id} y de X'_{iq} de todas las máquinas y de los parámetros de la red.

La expresión de la potencia no se da aquí aunque se la puede encontrar en la referencia. 5 de la bibliografía.

La complejidad de las expresiones de potencia para el caso de un conjunto de máquinas de polos salientes hace sumamente dificultosa el cálculo para las curvas de oscilación, es por ello que en la gran mayoría de problemas de estabilidad para multimáquinas, se consideren éstas como de polos lisos, de

sa pareciendo la saliencia. Se dará más adelante un ejemplo numérico donde se muestre que los cálculos con la suposición de polos lisos no difiere gran cosa del de polos salientes. El cálculo se hará por supuesto para una sola máquina empleando las ecuaciones Δ y β deducidas en el trabajo de máquinas sincronas.

PERTURBACIONES EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA ESTABILIDAD

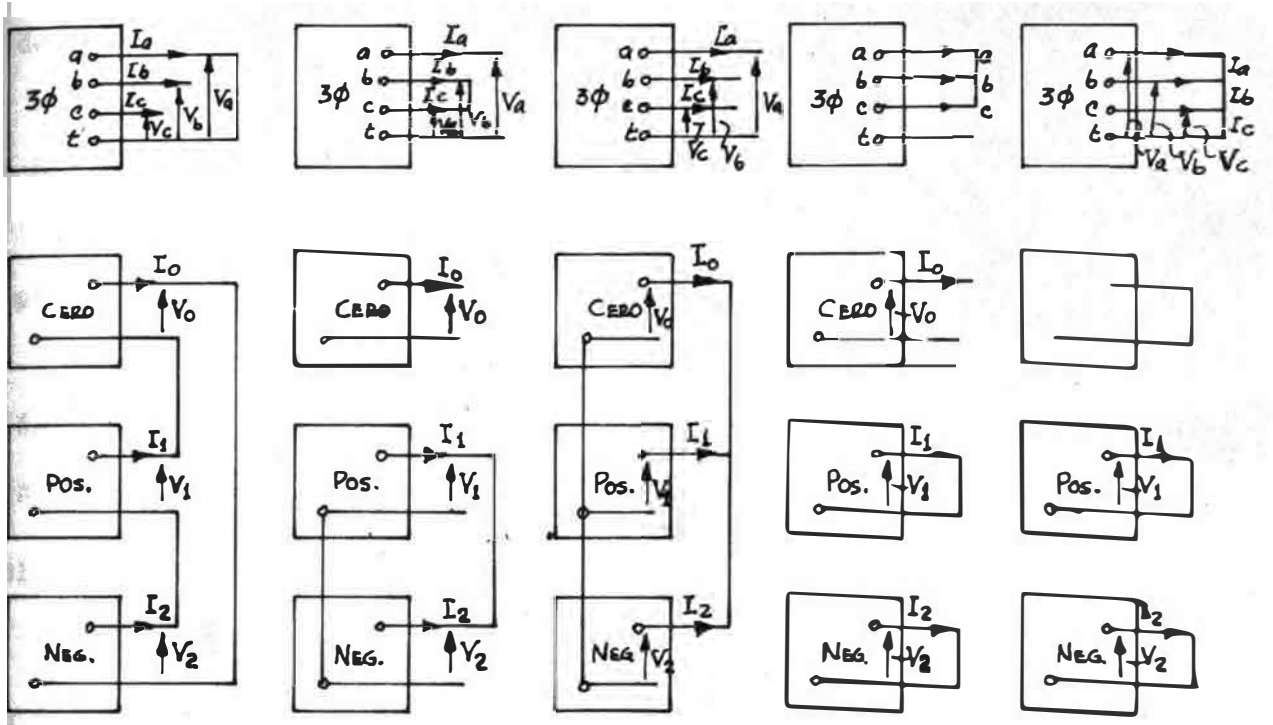
Entre las perturbaciones de un sistema de potencia, las principales que se van a considerar en el trabajo, son:

- 1) Variaciones súbitas de carga
- 2) Fallas
- 3) Maniobras

En lo que se refiere a las súbitas variaciones de carga, no es necesaria explayarse en la explicación, pues su consideración en los cálculos es inmediata. Un incremento de la carga obliga a cada máquina del sistema a entregar más potencia de la que estaba suministrando en el momento anterior de la perturbación, esto creará un **desequilibrio** entre las potencias mecánica y la eléctrica originándose una potencia acelerante. Se calculará entonces la potencia eléctrica de salida para la nueva condición de carga y hallando la diferencia con la potencia mecánica se tendrá la potencia acelerante para el momento inicial.

Las fallas y aperturas tanto simétricas como asimétricas necesitan ser representadas adecuadamente en la red de secuencia positiva (por donde circula la potencia sincrónica) para tomarla en consideración en el cálculo.

En las figuras que se dan a continuación, se muestran las conexiones de las redes de secuencia de acuerdo al tipo de falla y al tipo de apertura tanto simétrica como asimétrica.



Una falla de una línea a tierra como se ve, se representa por la conexión en serie de las tres redes de secuencia en el punto de la falla. En lo que se refiere a la red de secuencia positiva que es la que nos interesa, la falla se puede considerar como una impedancia $\bar{Z}_f = \bar{Z}_0 + \bar{Z}_2$ conectada entre el punto de falla y tierra, siendo Z_0 la impedancia equivalente de la secuencia cero en los bornes de la falla, y \bar{Z}_2 su similar pero de secuencia negativa.

La falla de una línea a otra línea se representa por la conexión de la impedancia equivalente de secuencia negativa en los bornes de la falla.

En una forma similar la falla de dos líneas a tierra que es la conexión de las redes de secuencia en paralelo en el punto de falla, se pondrá representar por una impedancia Z_f de

Valor
$$\bar{Z}_f = \frac{\bar{Z}_0 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2}$$

Resumiendo, las diferentes fallas se podrán representar en la red de secuencia positiva, por la conexión de una impedancia Z_f en los bornes de la falla, de valor:

<u>TIPO FALLA</u>	<u>IMPEDANCIA \bar{Z}_f</u>
Línea a tierra	$\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2$
Línea a Línea	\bar{Z}_2
2 Líneas a tierra	$\frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2}$
Trifásica	0

Si existiera un valor de impedancia en el c.c.s ría necesario incluirlo en el valor de .

En lo que se refiere a las aperturas, éstas también se representan por conexiones adecuadas de las redes de secuencia. La figura 6 muestra las diferentes aperturas con sus conexiones adecuadas.

De la misma forma como se representó las fallas por una impedancia conectada en los bordes de las fallas se puede representar las aperturas, por la conexión en serie en los puntos de apertura de una impedancia de valor :

<u>TIPO DE APERTURA</u>	<u>IMPEDANCIA EN SERIE</u>
Una línea abierta	$\frac{\bar{Z}_0 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2}$
Dos líneas abiertas	$\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2$
Las tres líneas abiertas.	

Aquí, Z_0 y Z_2 son las impedancias equivalentes en los extremos de la apertura de la red homopolar y de la red de secuencia negativa respectivamente.

ASPECTOS TEORICOS Y PRACTICOS DE LOS PROGRAMAS HECHOS

GENERALIDADES.- La finalidad principal de los, programas confeccionados es encontrar las curvas de oscilación de las máquinas (o máquina) conectadas a un sistema de potencia, cuando sucede una perturbación en la red. Para este objeto se ha realizado dos programas fundamentales; uno de ellos para el cálculo de la curva de oscilación de una sola máquina respecto a una barra infinita tomada como referencia, tanto para máquinas de rotor cilíndrico como para máquinas de polos salientes tomando en cuenta las saliencias. Estos programas están complementados por un conjunto de otros que le sirven al propósito de hallar los valores iniciales de la red, reducciones subsecuentes de la red, los valores de las admitancias necesarias para el caso de las perturbaciones.

bacio es asimétricas y otros de menor importancia.

Pasaremos a analizar ahora todos los programas principiando por los complementarios y finalizando por los dos principales.

PROGRAMAS PARA REDUCIR UNA RED.-

En la parte donde se dedujo las expresiones de potencia entregada a una red se vió que para su deducción se empleo unicamente los nodos donde se hallaban conectadas las máquinas, sin importarnos la estructura interior del sistema, y las potencias tenian factores dependientes de los elementos de la matriz de admitancia, nodales escrita para los nodos de las estaciones generadoras. Sin embargo en general los sistemas poseen un número relativamente grande de subestaciones que están representadas en la red por otros tantos nodos con sus respectivas cargas. Es necesario pues, proceder a la eliminación sistemática de los nodos representativos de las sub-estaciones y quedarnos tan solo con las estaciones generadoras con su matriz de admitancias nodales representativas, con este propósito, se hicieron dos programas que realizaban este propósito, uno por medio matricial y otro por un medio mas inmediato cuyo aspecto teórico se va a explicar.

1º PROGRAMA DE REDUCCION. METODO MATRICIAL.-

En el método matricial, se utiliza el algoritmo de Kron (Ver referencial) que consiste en principio del siguiente criterio:

Sea la red mostrada en la figura 7 donde se representan la totalidad de nodos del sistema y se indican por 1, 2, 3, ..., n, las estaciones generadoras y por 1', 2', 3', ... n' las subestaciones.

Será:

Donde $\begin{bmatrix} \bar{I} \end{bmatrix}$ es la matriz columna de las corrientes de entrada a cada $\begin{bmatrix} E \end{bmatrix}$, la matriz de tensiones de cada nodo (respecto al nodo de tierra 0) y $\begin{bmatrix} \bar{Y} \end{bmatrix}$ la matriz cuadrada simétrica de admitancias nodales de la totalidad de la red.

La matriz $\begin{bmatrix} \bar{I} \end{bmatrix}$ la podemos particionar en dos submatrices, una de ellas correspondientes a los nodos 1, 2, 3, ... n; y la otra correspondiente a los nodos 1', 2', 3', ... n'; quedará entonces:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{aa} & \bar{Y}_{ab} \\ \bar{Y}_{ba} & \bar{Y}_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \end{bmatrix} \quad \dots \dots (26)$$

Puesto que en los nodos 1', 2', 3', ... n'; no existe fuerza electromotriz, las corrientes de entrada $\begin{bmatrix} \bar{I} \end{bmatrix}$ serán cero y la ecuación quedará

$$\begin{bmatrix} I_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{aa} & \bar{Y}_{ab} \\ \bar{Y}_{ba} & \bar{Y}_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \end{bmatrix} \quad \dots \dots (27)$$

De aquí:

$$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{ba} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E}_b \end{bmatrix} \quad \dots \dots (28)$$

De la segunda de estas ecuaciones se tiene:

$$\left[\bar{E}_b \right] = - \left[\bar{Y}_{bb} \right]^{-1} \left[\bar{Y}_{ba} \right] \cdot \left[\bar{E}_a \right] \quad \dots \dots (29)$$

azando en la primera:

Se tendrá finalmente:

$$\dots \dots (31)$$

Y se ha eliminado los nodos 1', 2', 3', ... n';. La fórmula nos dá la forma de cálculo de $\left[\bar{Y}_a \right]$ en función de $\left[\bar{Y} \right]$. Los elementos Y_{ik} de $\left[\bar{Y}_a \right]$ son los que intervienen en las fórmulas de potencia.

Este primer programa realiza la operación para los valores de los elementos de $\left[\bar{Y} \right]$. La dificultad principal es el cálculo de $\left[\bar{Y}_{bb} \right]^{-1}$ siendo los elementos números complejos, se hizo también un programa para invertir matrices de números complejos, pero llevando a cabo el programa se vió que éste demoraba demasiado, así que se prefirió intentar otra manera eliminando el tener que hallar $\left[\bar{Y}_{bb} \right]^{-1}$ para ello se ideó eliminar nodo por nodo,

de tal manera de que la matriz $\left[\bar{Y}_{bb} \right]^{-1}$ para un nodo solo contenía un elemento y era fácil calcular $\left[\bar{Y}_{bb} \right]^{-1}$, tomando la inversa del número complejo. Proceder así a eliminar el resto de nodos sucesivamente hasta quedarnos con los nodos deseados.

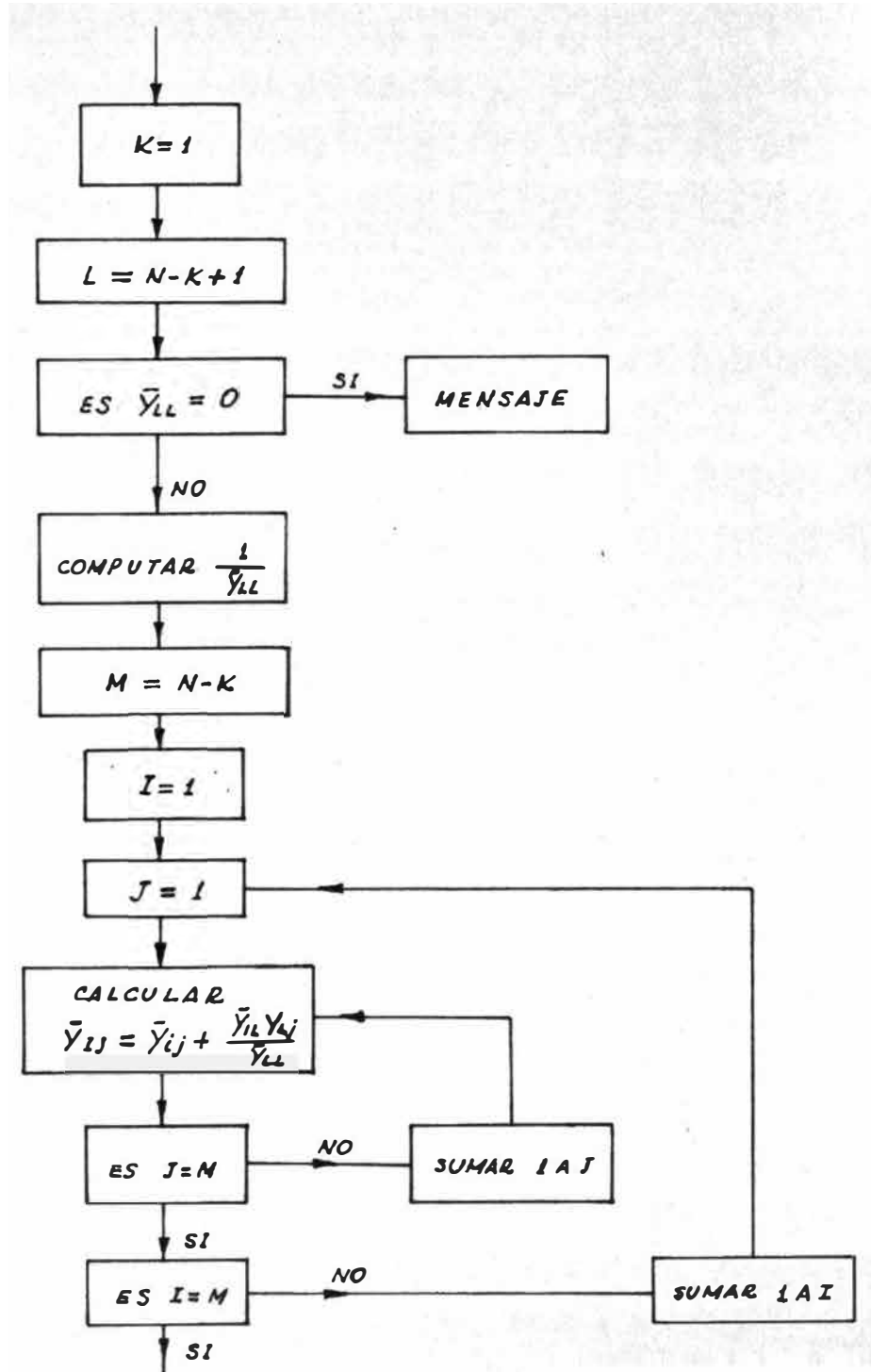
Se da a continuación el diagrama de flujo del programa, además el diagrama de flujo del programa para llamar esta subrutina.

PROGRAMA

```
1      SUBROUTINE RED(A,B,N2,N)
2      DIMENSION A(15,15),B(15,15)
3      DO 10 K=1,N2
4      L=N-K+1
5      ANN=A(L,L)**2+B(L,L)**2
6      IF(ANN)40,20,40
7 40   A(L,L)=A(L,L)/ANN
8      B(L,L)=-B(L,L)/ANN
9      M=N-K
10     DO 10 I=1,M
11     DO 10 J=1,M
12     A(I,J)=A(I,J)-A(I,L)*A(L,L)*A(L,J)+B(I,L)*B(L,L)*A(L,J)
13     A(I,J)=A(I,J)+A(I,L)*B(L,L)*B(L,J)+B(I,L)*A(L,L)*B(L,J)
14     B(I,J)=B(I,J)-A(I,L)*B(L,L)*A(L,J)-B(I,L)*A(L,L)*A(L,J)
15     B(I,J)=B(I,J)-A(I,L)*A(L,L)*B(L,J)+B(I,L)*B(L,L)*B(L,J)
16 10   CONTINUE
17     RETURN
18 20   PRINT 5
19 5    FORMAT(25HLOS DATOS ESTAN MAL DADOS)
20     RETURN
21     END
```

SUBROUTINA RED - MÉTODO MATRICIAL

DIAGRAMA DE FLUJO



REGRESAR A PROGRAMA PRINCIPAL

Los datos necesarios para el programas son los valores de las admitancias de sus valores reales e imaginarios y el número de nodos que van a quedar en la red.

Hay que tener cuidado de colocar los nodos que se quieren eliminar al final de la matriz, pues el programa elimina los últimos nodos y procede hacia adelante.

2º PROGRAMA DE REDUCCION. METODO CLASICO DE CONVERSION ESTRELLA - MALLA.-

La dificultad principal que posee el programa anterior es el requerir a gran capacidad de memoria por parte de la computadora. El hecho de tener que almacenar tanto la parte real como la parte imaginaria de la matriz de admitancias nodales, limita el número de nodos a emplear. El número total de elementos de la matriz es N^2 siendo N el número de nodos. Para una cantidad mediana de nodos supongamos 50, se necesitarían 2,500 posiciones decimales, que equivalen a 25,000 posiciones de memoria tanto para la parte real como la imaginaria de $\left[\begin{matrix} \text{ } \\ \text{ } \end{matrix} \right]$, lo que hace 50,000 posiciones de memoria. Puesto la capacidad de nuestra computadora es de tan solo 60,000 y el procesador requiere 20,000 posiciones adicionales, hace que este problema rebace la capacidad de la máquina. Es necesario pues tener programa que utilice menos memoria para poder manejar problemas mas complicados

Como en un sistema de potencia el, número de líneas que salen y llegan a él no es muy grande, es preferible almacenar los valores de las admitancias de la red, no en si forma matricial, sino mas bien teniendo la admitancia de cada línea e indicando sus dos nodos extremos. Se limita ahora no el número de nodos sino el número de línea. Si se toma en promedio 3 líneas por estación, cien nodos dará en total 300 líneas y necesitamos tan solo tener 300 posiciones decimales por la parte real y 300 por

1 imaginaria lo que hace un total de 6,000 posiciones de memoria, reduciendo en más de 8 veces la necesaria en el caso anterior que era tan solo para 50

El programa consiste en última instancia en el conocido método de la reducción estrella - malla con la que se elimina un nodo. Procediendo sucesivamente se eliminará todos los nodos que se quieran.

LAS FIGURAS 8 Aclara las formulas de reducción.-

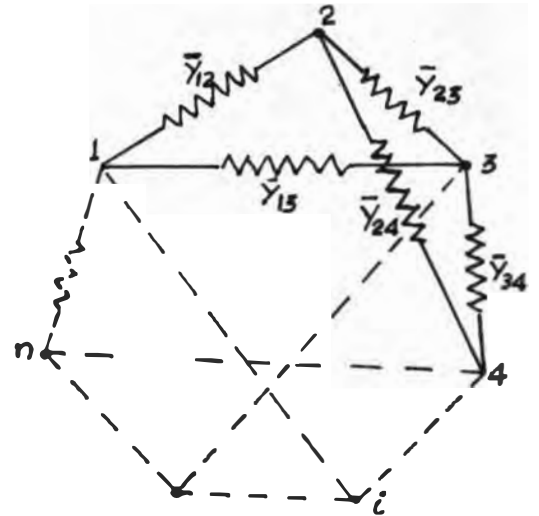


FIGURA N° 8

$$\sum_{i=1}^p \bar{y}_i \quad ; \quad \bar{y}_{13} = \frac{\bar{y}_1 \bar{y}_3}{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i} \quad \text{Y en General:}$$

$$y_{ik} = \frac{\bar{y}_i \bar{y}_k}{\sum_{j=1}^n \bar{y}_j} \quad \dots \dots (32)$$

Estas formulas se deducen sin dificultad del mismo método matricial anterior, si se eliminan solo un nodo.

Los valores de \bar{y}_i se dan de datos en el problema, indicando además en tre cua es nodos está colocada. La rutina de eliminación no es dificultosa.

Se dá a continuación el diagrama de flujo del programa

Puesto que en caso de fallas, éstas son necesarias calcularlas para poderlas representar adecuadamente en la red de secuencia positiva, se ha realizado un programa adecuado que encuentra \bar{Y}_f para cada tipo de falla o apertura asimétrica. Los valores de \bar{Y}_f para cada tipo de perturbación se dio en la parte de fallas. El problema se reduce a encontrar las admitancias equivalentes en los bornes de la falla tanto para la secuencia negativa como homopolar y conectarla de acuerdo a la perturbación.

Los dos programas realizados, difieren solamente en que uno utiliza la reducción de la red en forma matricial y la otra en la forma de conversión estrella-malla.

Estos programas están capacitados para encontrar en un mismo momento las admitancias equivalentes de hasta 5 fallas en una pasada del programa.

Una de las dificultades que se encontró fue lo referente a los puntos (nodos) entre los cuales sucedía la perturbación. Puesto que estos podían ser diferentes para cada caso (y no necesariamente los nodos numerados como últimos) y la subrutina de reducción precede a eliminar siempre los nodos últimos en su numeración, era necesario cambiar la designación de los nodos en cada caso colocando los nodos en los cuales se quiere hallar la \bar{Y}_f equivalente con los primeros números (1 y 2) de tal manera que no se eliminen en el proceso de reducción. Había que tener pues otro subprograma que realizaré esto dentro del programa principal. Estos dos subprograma se han denominado Subrutina ORD y Subrutina ORDEN. La primera que es la que trabaja por el método matricial lo que hace es intercambiar filas y columnas de la matriz que se quiere reducir, de tal manera que las correspondientes a los nodos que se

queiere dejar aparescan al principio de la matriz. En la segunda lo único que se hace es cambiar de denominación a los nodos, de tal manera que los nodos que no se van a eliminar queden con los números 1 y 2.

Se da a continuación los diagramas de flujo de estos tres programas

El propósito de este programa es el cálculo de las condiciones iniciales estacionarias del sistema. Puesto que en las ecuaciones diferenciales de oscilación es necesario el conocimiento de los valores de las tensiones detrás e la impedancia transitoria y los ángulos de estas tensiones en el momento estacionario previo a la perturbación normalmente en los sistemas de potencia no se conocen los valores de las tensiones detrás de las impedancias transitorias y menos aun de los valores de los ángulos. Los datos normales son las potencias activas y reactivas en cada estación o subestación o en otro caso la potencia activa y la tensión de la estación (la tensión en valor absoluto por supuesto) de estos valores se tiene que calcular las tensiones internas y sus posiciones angulares. El problema es verdaderamente difícil. Las expresiones de potencia, son un conjunto de ecuaciones cuadráticas complejas que necesitan ser resueltas para cada E_i o para los ángulos ϵ_i y las potencias reactivas Q_i , si se dan respectivamente P_i y Q_i o P_i y \bar{E}_i .

El proceso para resolver estas ecuaciones numéricamente mas común y es el que se utiliza aquí es un método iterativo conocido con el nombre de Gauss-Siedel. En este método se principia por asumir unos valores iniciales para las incógnitas y con estos valores resolver una ecuación para una incógnita; utilizar este nuevo valor y los otros valores para calcular otra incógnita de otra ecuación y seguir así sucesivamente con el resto de ecuaciones e incógnitas. Después de esta primera iteración se comienza una nueva vez con los valores nuevos encontrados en la primera iteración. Así, se irá aproximando a los valores correctos. El proceso se completará cuando la diferencia entre un valor antiguo y uno nuevo sea pequeño, no excediendo del valor que nosotros hallamos escogido por error.

Veamos esto mas detenidamente.

Las expresiones de potencia deducidas anteriormente nos ayudarán a aclarar el método seguido.

Tenemos:

$$\bar{N}_i = P_i + j Q_i \quad \bar{E}_i \sum_{k=1}^n \hat{Y}_{ik} \hat{E}_k$$

O si tomamos los conjugados de ambos miembros

$$\hat{N}_i = P_i - j Q_i \quad \hat{E}_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} \bar{E}_k$$

O también

$$\hat{N}_i = P_i - j Q_i \quad \hat{E}_i \left(\bar{Y}_{ii} \bar{E}_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n \bar{Y}_{ik} \bar{E}_k \right)$$

De aquí

$$E_i = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{\hat{E}_i} - \sum_{k=1, k \neq i}^n \bar{Y}_{ik} \bar{E}_k \right] \dots (33)$$

Estas son las ecuaciones utilizadas en el método iterativo si se conocen P y Q para cada estación o subestación; se comienza suponiendo valores de E_i y se sustituye este valor estimado de \hat{E}_i en la ecuación ; se encuentra un nuevo valor de \hat{E}_i cuyo conjugado no coincidirá en general con \bar{E}_i supuesto. Se puede seguir mejorando el valor de E_i empleando el nuevo valor encontrado en la ecuación . Se recomienda hacer solo dos cálculos sucesivos de \bar{E}_i . (Ver referencia). Puesto que el resto de tensiones no son las verdaderas, hacer mas de dos cálculos en la ecuación (33) no mejorará el valor de E_i . Se continúa ahora con la siguiente incógnita E_{i+1} , sustituido ahora E_i por su nuevo valor, Al llegar a E_n , se han obtenido nuevos valores de E_i . Se continúa el proceso hasta obtener la aproximación que se desea.

Puesto que las ecuaciones (33) no son todas independientes pues están escritas para la totalidad de nodos es necesario poner una estación o subesta

ción de referencia donde se supone la tensión \bar{E}_1 , Constante e igual a 1 por unidad con ángulo cero. Por supuesto P_1 y Q_1 no deben darse para este nodo sino se calculará al final por la ecuación.

Si en una estación o subestación se conoce \bar{E}_K y no se conoce Q_K ; se calculará primero Q_K de la ecuación:

$$Q_K = -\text{imaginaria} \left[\hat{E}_K \left(\bar{Y}_{KK} \bar{E}_K + \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{Kj} \bar{E}_j \right) \right] \dots (34)$$

que sale de la ecuación.

Este valor de Q_K , se utilizará ahora en la ecuación para calcular \bar{E}_K . Como $[\bar{E}_K]$ es constante y se conoce, se multiplica la parte real e imaginaria de \bar{E}_K por $\frac{|\bar{E}_K|_{\text{calculada}}}{|\bar{E}_K|_{\text{conocida}}}$; de tal manera de mantener su magnitud constante al valor dado.

Se ha encontrado el número de iteraciones para llegar a los valores deseados de las incógnitas es bastante grande y aumenta notablemente si aumenta el número de nodos. Es necesario pues acelerar el método para lo cual se multiplica las diferencias entre los valores antiguos y nuevos de las incógnitas por unos factores acelerantes y sumar ahora estas cantidades a las tensiones antiguas para encontrar las nuevas. aclarando; si llamamos E_{ia} , A la tensión antigua y E_{in} a la tensión nueva recién encontrada al resolver la ecuación (33), reemplazar este valor por:

$$E_{ia} = E_{ia}^R + j E_{ia}^I, \quad E_{in} = E_{in}^R + j E_{in}^I$$

$$\Delta E_{in}^R = E_{in}^R - E_{ia}^R \quad ; \quad \Delta E_{in}^I = E_{in}^I - E_{ia}^I$$

Donde los superíndices indican la parte real e imaginaria de los vectores, k_r el factor acelerante para la parte real y k_i el factor acelerante para la parte imaginaria.

Se puede encontrar experimentalmente los valores de k_r y k_i más eficientes para cada sistema. Muchos de estos experimentos han llevado a tomar como un factor correcto el valor $k = k_r = k_i = 1.6$.(Ver referencia)

Este valor de k se ha utilizado en el programa desarrollado. Se da a continuación el diagrama de flujo del programa.

PROGRAMA PARA CALCULAR LA CURVA DE OSCILACION DE UNA MAQUINA SINCRONA TANTO DE POLOS SALIENTES COMO DE ROTOR CILINDRICO.-

La inclusión de la saliencia en las ecuaciones de potencia de una sola máquina conectada a una barra considerada infinita es factible y su expresión ya se dedujo en el capítulo de máquinas síncronas. Es por esto que el programa realizado es tanto considerando saliencia como despreciando la saliencia.

El método paso-a-paso es utilizado para el cálculo de la curva de oscilación, lo mismo que el método unitario para la máquina y la red.

La tensión V de la barra infinita se considera como base y se supone su valor de 1 por unidad con ángulo cero. El ángulo δ está dado en radianes eléctricos pues la computadora trabaja con radianes para las funciones trigonométricas.

Hay que aclarar un punto en lo que se refiere a las unidades de la constante de inercia de la máquina. Los fabricantes de máquinas dan frecuentemente otros datos donde no interviene en muchos casos el valor de M . Dan el valor del momento de inercia de la máquina ωR^2 de donde se puede calcular el valor de M de la fórmula:

$$M = \frac{\omega R^2 f}{p^2} \dots \dots (36)$$

Donde p es el número de pares de polos, f la frecuencia. Si este valor se divide entre la potencia base, se obtiene M en valor unitario (aunque realmente tiene una dimensión). También se suele dar el valor de una constante H que es la energía cinética almacenada en la máquina dividida entre la potencia de placa de la máquina, la energía cinética se refiere a la velocidad nominal en este caso M vendría dada por :

$$M = \frac{G H}{18 f}$$

Donde G es la potencia nominal de la máquina.

Existen curvas que dan H según el tipo de máquina y el valor de G . Se da a continuación estas curvas sacadas de la referencia .

Entre los datos adicionales que necesita el programa, están los valores de las impedancias en serie entre los bornes de la máquina y la barra infinita para cada estado de la red (de discontinuidades de la potencia acelerante) que se calcula fácilmente de las diferentes condiciones del sistema. Se tiene capacidad hasta para cinco perturbaciones en todo el proceso del cálculo que son más que suficientes. Es necesario tener también los tiempos en los cuales suceden estas perturbaciones.

El programa da posibilidades de recalcular las curvas de oscilación para valores diferentes del ángulo inicial (no es otra cosa que variar la potencia inicial). Para poder calcular el límite de estabilidad para un tipo de perturbación dado.

Se da a continuación el diagrama de flujo del programa.

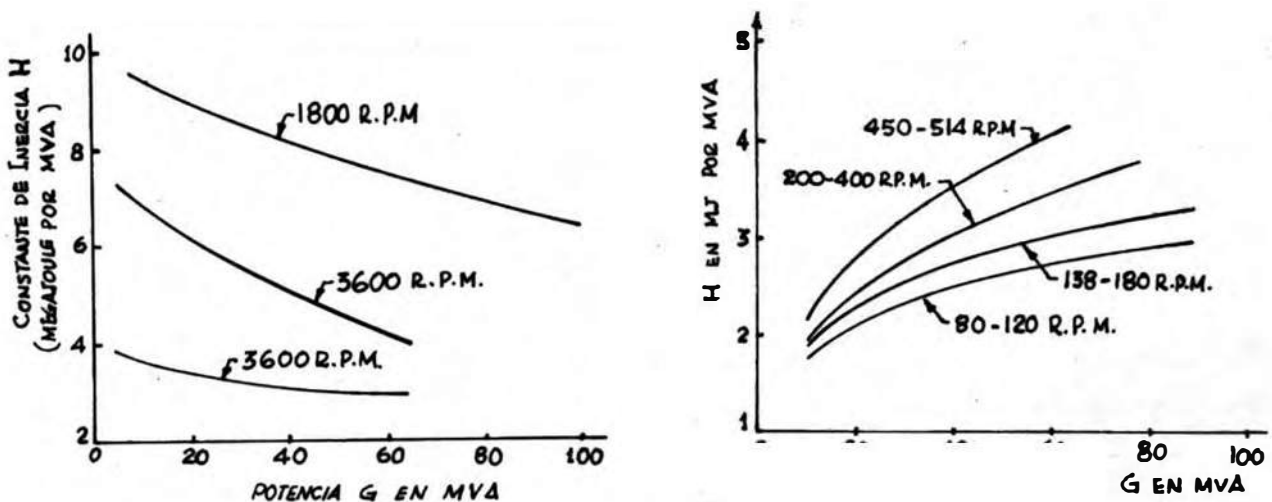


FIGURA N° 9

PROGRAMA PARA CALCULAR LAS CURVAS DE OSCILACION DE UN CONJUNTO DE MAQUINAS CONECTADAS A UN SISTEMA

Puesto que las expresiones de las potencias para el caso de un conjunto de máquinas conectadas a una red de potencia para el caso de considerar la saliencia de las máquinas es sumamente complicada, y su consideración no lleva a cálculos más exactos, el programa hecho no contempla el caso de saliencia.

El programa desarrollado utiliza el método matricial en su conjunto, de tal manera que requiere una capacidad de memoria bastante grande. Este programa sin embargo se puede modificar sin mayor dificultad para utilizar los subprogramas de reducción y de ordenamiento 1 que no requiera de una capacidad de memoria tan grande y poder resolver problemas en los cuales existan 300 líneas 100 subestaciones y 30 estaciones generadoras.

Los problemas principales que resolver en este programa, son: el que se refiere al seleccionamiento de los tiempos en que ocurren las fallas y la modificación que debe sufrir la red en cada una de éstas, fallas. Puesto que el momento inicial se considera siempre como el punto en que comienza una perturbación, y como se vió en los párrafos anteriores, el cálculo de la potencia acelerante difiere de la forma de calcularla del resto de puntos, tanto debido a la discontinuidad de la potencia acelerante como a que el estado de la red previo a la perturbación es estacionario; es necesario calcular el primer punto de una forma particular.

En el resto de puntos de perturbación se procede a calcular la potencia acelerante como el promedio aritmético de las potencias antes y después de la perturbación como se indicó en los párrafos anteriores.

En lo que se refiere a las perturbaciones, se han contemplado en el programa los siguientes tipos:

- a) Corto circuito trifásico
- b) Corto circuito asimétrico
- c) Apertura de una línea (en ambos extremos simultáneamente)
- d) Apertura asimétrica (una o dos líneas)
- e) Aislamiento total de una subestación.

Cuando se indica que la perturbación es un c.c. trifásico el programa procede a alterar la matriz de admitancias nodales de la red, de tal manera de identificar el punto de cc. con el punto de tierra, de tal manera que en la matriz, la fila y columna del nodo cc. se suma a la fila y columna respectivamente del nodo de tierra y se elimina (por medio de la subrutina ORD) la fila y columna del nodo c.c.

Si la falla es asimétrica, en los datos de entrada se habrá dado el valor de la admitancia de falla según el tipo de falla, y este valor se agregará en la matriz de admitancias nodales de la red entre el nodo de c.c. y el nodo de tierra.

En el caso de apertura de una línea, se procede a eliminar la admitancia de la línea de la matriz de admitancias nodales, correspondiente a los nodos entre los cuales está colocada la línea.

La apertura asimétrica de una línea se toma en cuenta, conectando en serie con los puntos de apertura la admitancia equivalente de apertura, modificando así los valores de admitancia entre los nodos de apertura en la matriz de admitancias nodales de la red.

Finalmente, el aislamiento de una subestación se realiza por la eliminación de todas las admitancias que llegan al nodo correspondiente y por lo tanto eliminar de la matriz de admitancias nodales la fila y columna del nodo de la subestación.

Una vez que el programa a seleccionado los tiempos de falla y a modificado la red según la perturbación es necesario reducir la red, de tal manera de solo tener los nodos de las estaciones generadoras que son los puntos que nos interesan para calcular las potencias acelerantes según vimos en la parte de potencia eléctrica. Este proceso lo realiza la subrutina de reducción (red), dejándonos solo la matriz de admitancias nodales para las estaciones generadoras.

Una vez reducida la red se resuelve la ecuación de oscilación para cada máquina por el método paso a paso, calculando las potencias acelerantes para cada punto, teniendo la red reducida. Este proceso continua hasta que se llega a un tiempo cuando sucede otra perturbación; en este caso, se procede a modificar otra vez la red, a calcular la discontinuidad de la potencia acelerante y el ciclo se repite obteniéndose cuantos puntos se desee de las curvas de oscilación.

Se da a continuación el diagrama de flujo del programa.

POSIBILIDADES Y ALCANCES DE LOS PROGRAMAS.

El programa de reducción de redes nos ofrece, en una forma eficiente, la posibilidad de resolver no solo parte del problema de estabilidad, sino también problemas en que se desee saber la admitancia o impedancia equivalente de una red respecto a dos puntos cualesquiera de ella.

Para hallar el circuito Thevenin equivalente de una determinada red, es parte imprescindible el conocimiento de la impedancia equivalente en los bornes respecto a los cuales se quiere hacer el reemplazo. En este caso nos es de suma utilidad este programa. Se posee además otro programa que no se ha indicado en este trabajo que nos permite encontrar todas las relaciones funcio

nales de una red respecto a 2 pares de terminales (por ejemplo $\frac{E_i}{E_k}$, $\frac{I_i}{I_k}$, $\frac{E_i}{I_k}$, $\frac{I_i}{E_k}$, etc.) de tal manera que nos es posible determinar la tensión a circuito abierto para construir el circuito Thevenin equivalente.

Quizás el único inconveniente que tiene éste es el de requerir bastante tiempo cuando la red es muy grande. La reducción de una red con diez nodos a una con dos requiere aproximadamente minutos, aumentando cuadráticamente el tiempo con el aumento del número de nodos.

En lo que se refiere al programa de flujo de potencia, es casi obvio recalcar sus grandes ventajas. Este programa permite la solución de un sistema en el estado estacionario. Aunque no da las corrientes que circulan en las líneas, éstas son fáciles de determinar conociendo las tensiones de todos los nodos, de tal manera que esto no es una limitación.

En referencia a la estabilidad, este programa ayuda en una forma sistemática a determinar las condiciones de generación (límite de estabilidad) para que una red sea estable bajo determinadas perturbaciones, la determinación de las condiciones iniciales para redes con más de dos máquinas es la parte más laboriosa en la determinación de las curvas de oscilación, pues éstas requieren, cuando se procede a su cálculo en forma manual, al método de tanteos que es sumamente laboriosa; lo que imposibilita, cuando no se posee medios automáticos (calculadoras digitales, analizadores de redes, etc.) de obtener estos resultados en forma práctica y eficiente.

La limitación principal de este programa, como en el anterior, es el tiempo de máquina que se requiere para llegar a los resultados. Con un ejemplo de 10 nodos se llegó al resultado en 20 minutos, exigiéndose una aproximación hasta 0.001; si se baja esta aproximación es posible llegar a los resultados en un tiempo más corto; pero esto no garantiza que el tiempo requerido para un número mayor de nodos sea relativamente bajo. Puesto que el método utiliza

do en el programa es iterativo, no se puede estimar el tiempo que se va a demorar pues, puede no llegar del todo a una solución si es que los valores iniciales estimativos no son adecuados; o en otros casos dar resultados completamente ilógicos debido a que el sistema de ecuaciones cuadráticas complejas posee varias soluciones. Aunque esto es una dificultad, es fácil reconocer los resultados erróneos y entonces proceder a poner otros valores iniciales estimativos.

El programa para calcular la curva de oscilación de una máquina sincrona de polos lisos o salientes nos ofrece todas las posibilidades para tratar cualquier programa de estabilidad de una sola máquina conectada a una red infinita (potencia de la red - resto de máquinas - es mucho mayor que la potencia que entrega la máquina). Una parte del programa permite calcular la curva de oscilación para otro ángulo inicial, aumentándolo éste de una cantidad preestablecida, de tal manera de variar la potencia que entrega la máquina, con lo cual nos posibilita de poder determinar el límite de estabilidad (máxima potencia que entrega la máquina) para un caso de perturbación. Variando el tiempo de eliminación de una falla se puede encontrar el momento crítico de apertura (o cierre) de una línea fallada que mantenga el circuito estable. Este programa permite tratar tanto fallas y aperturas simétricas como asimétricas. En lo referente al tiempo de empleo de la calculadora, se puede decir que es ínfimo en comparación de la preparación de los datos y solo depende del número de puntos que se quieren determinar. Para un ejemplo de 20 puntos, la máquina requirió 2 minutos en dar la totalidad de los resultados.

El programa mas grande, o sea el que calcula las curvas de un conjunto de máquinas, ofrece también una gran variedad de posibilidades para tratar los problemas a mano. Es capaz de manejar hasta 5 perturbaciones consecutivas, pudiéndose aumentar hasta 100 sin dificultad. El número de máquinas del programa actual es de cinco, pero bastaría cambiar el dimensionamiento para elevar su número hasta 100 máquinas y aun subir más con el acoplamiento de discos que va a tener la computadora. Si se cambia el programa para utilizar las subrutinas de ordenamiento y reducción que emplean el método clásico estrella-malla, se puede subir automáticamente su valor a treinta máquinas y 100 subestaciones. Existe una limitación de tiempo puesto que la subrutina de reducción demora un poco. Se han obtenido resultados para un problema con 3 máquinas y 11 subestaciones en 20 minutos con todos los resultados. Otra limitación que existe es la referente a la variación de las condiciones iniciales, pues estas no las puede calcular el programa internamente; se requiere para ello utilizar el program de flujo de potencia cada vez que se quiera cambiar las condiciones iniciales. Quizá con la puesta en servicio de la unidad de discos se pueda incluir el program de flujo de potencia en el programa de curvas como una subrutina haciéndolo a éste bastante ágil.

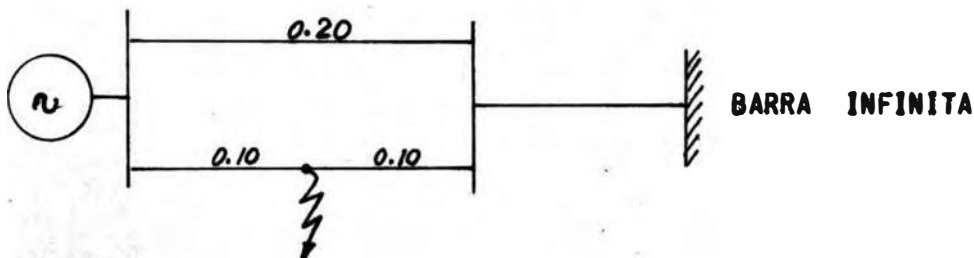
El programa también permite entrar en cualquier parte del cálculo para modificar ya sea un tipo de falla o los incrementos de tiempo (Δt) que permitan hallar puntos mas cercanos que permitan trazar mejor las curvas o mejorar la exactitud de los cálculos en un caso determinado.

Se darán a continuación 3 ejemplos de aplicación de los programas. Se podrían haber dado una gran variedad de ejemplos, pero esto no ha sido posible debido al poco tiempo de disponibilidad de la computadora; esto no disminuye de ninguna manera las grandes posibilidades que nos ofrece los

programas, pues el tratamiento de un de eral
variación de los datos de entrada más no de una modificaci de l progra-
mas. Se ha escogido a propósito dos de los ejemp es; aunque con ificacio-
nes con el propósito de mostrar los alcances de los programas; del libro de
Kimbar "Power System Stability" tomos 1 y 2, con la finalidad de comparar
los resultados de uno y otro método y poder visualizar el gran ahorro de
tiempo y la más exactitud de los cálculos que se logra la computadora.

El primer ejemplo se refiere al cálculo de las curvas de oscilación de
una máquina sincrona conecta a travez de 2 líneas de transmisión a una barra
infinita. Se cede un C.C. a la mitad de una de las líneas y se desea saber
el tiempo crítico de apertura de los interruptores de la línea fallada para
que la máquina se conserve en sincronismo, tanto suponiendo la máquina de p
los lisos como de polos salientes. Además saber el límite de estabilidad pa-
ra esta falla (potencia máxima que entrega la máquina) si la falla se elimi-
na a 0.4 seg. de sucedida. Este límite se ha hallado para la máquina conside-
rada de polos lisos.

DATOS:



MAQUINAS POLOS LISOS: $x'd = 0.3 \text{ p.u.}$

$M = 0.01472 \text{ p.u.}$ Base 25 MVA.

$MVA = 25$

$E'd = 1.03 \text{ p.u.}$

LINEAS = $X_L = 0.20 \text{ p.u.}$

PM 20 MW = 0.8 p.u.

MAQUINA POLOS SALIENTES:

$X_d = 1.1 \text{ p.u.}$

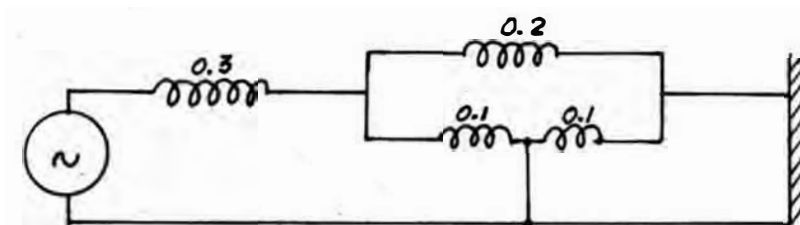
$X'_q = 0.7 \text{ p.u.}$

$X'd = 0.3 \text{ p.u.}$

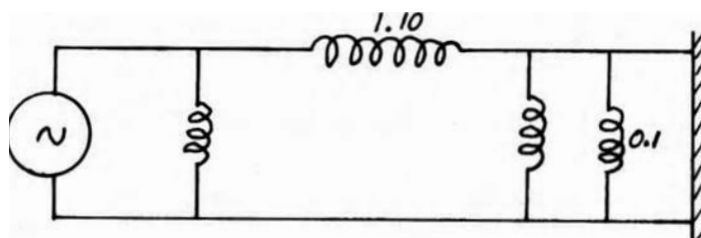
$X_q = 0.7 \text{ p.u.}$

$E'd = 1.03 \text{ p.u.}$

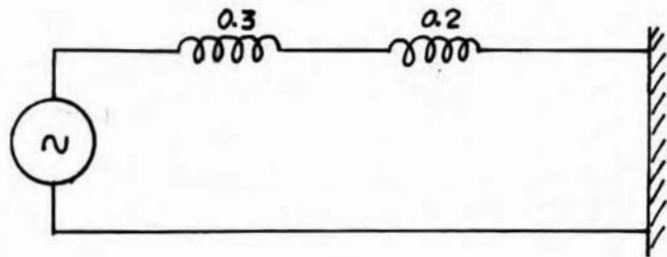
CUANDO SUCEDE EL C.C. TRIFASICO:



O SEA



EN LA APERTURA



ENTONCES C.C. Trifásico X externa = 0.8
 Apertura X externa = 0.2
 EL ANGULO INICIAL SERA: Polos lisos

$$P_M = \frac{E_A E_B}{X_{TOTAL}} \sin \delta = \frac{1.03 \cdot 1.00}{0.40} \cdot \sin \delta$$

$$= 2.58 \sin \delta$$

$$\therefore \sin \delta = \frac{P_M}{2.58} = \frac{0.80}{2.58} = 0.31$$

$$\delta = 18.1^\circ = 0.316 \text{ radianes eléctricos.}$$

POLOS SALIENTES:

$$\frac{E'_g E_B \sin \delta}{X'_d + X_{ex.}}$$

$$0.8 = \frac{1.02 \sin \delta}{0.7} - \frac{(0.7 - 0.4)}{2(0.3 + 0.4)(0.7 + 0.4)} \sin 2\delta$$

DE AQUI SALE :

$$\delta' = 31.7^\circ = 0.552 \text{ radianes.}$$

Los incrementos de tiempo se han tomado de 0.05 seg. en 0.05 seg.

De las curvas se puede determinar claramente los tiempos críticos de apertura para ambos tipos de máquina. Estos son 0.65 para polos lisos y 0.75 para polos salientes. Se ve las curvas de oscilación difieren poco una de otra para un mismo tiempo de apertura. Es lógico tener un tiempo crítico mayor para la de polos salientes, pues se vio en el capítulo de máquinas que para un determinado ángulo la potencia eléctrica de una máquina de polos lisos es mayor que la de polos salientes y por lo tanto la diferencia entre la potencia mecánica constante y la eléctrica da la potencia acelerante y ésta será menor para la máquina de polos salientes sufriendo oscilaciones con menos amplitud.

De los otros gráficos se determina el límite de estabilidad para una apertura de 0.4 seg., de 22.8 MW. estas curvas se hallaron con variaciones del ángulo inicial de 0.01 radianes.

SEGUNDO EJEMPLO.-

Se tiene un sistema con 2 centrales que suministran energía a 3 subestaciones se desea saber el tiempo crítico de apertura de los interruptores de una línea donde sucede un C.C. a) trifásico a mitad de la línea y b) monofásico a mitad de la línea, para conservar el sincronismo de las dos centrales.

APERTURA : 0.20 SEG.

ANGULO INICIAL = .34000

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.48773	.04141	.38141	.82835
.10	.45145	.11809	.49950	2.36181
.15	.35148	.17778	.67729	3.55572
.20	.21319	.21399	.89128	4.27988
.25	-.36540	.15193	1.04322	3.03068
.30	-.97990	-.01448	1.02873	-.28979
.35	-.96469	-.17832	.85040	-3.56659
.40	-.74818	-.30539	.54500	-6.10799
.45	-.26794	-.35090	.19409	-7.01814
.50	.40266	-.28251	-.08842	-5.65039
.55	.98191	-.11575	-.20417	-2.31508
.60	1.21768	.09105	-.11312	1.82108
.65	1.03253	.26641	.15329	5.32833
.70	.48544	.34886	.50215	6.97728
.75	-.19151	.31633	.81849	6.32675
.80	-.70404	.19676	1.01526	3.93529
.85	-.95021	.03538	1.05064	.70767
.90	-.98755	-.13233	.91830	-2.64678
.95	-.83682	-.27446	.64384	-5.48924
1.00	-.43656	-.34860	.29523	-6.97214

POÑER SWITCH 1 EN ON. SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO

APERTURA : 0.40 SEG.

ANGULO INICIAL = .34000

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.48773	.04141	.38141	.82835
.10	.45145	.11809	.49950	2.36181
.15	.35148	.17778	.67729	3.55572
.20	.21319	.21399	.89128	4.27988
.25	.07161	.22615	1.11744	4.52315
.30	-.04177	.21906	1.33650	4.38125
.35	-.11078	.20024	1.53675	4.00495
.40	-.13582	.17718	1.71393	3.54360
.45	-.68285	.06120	1.77514	1.22411
.50	-1.21713	-.14550	1.62963	-2.91019
.55	-1.25643	-.35889	1.27073	-7.17797
.60	-1.16795	-.55726	.71347	-11.14521
.65	-.54819	-.65036	.06310	-13.00729
.70	.67008	-.53656	-.47345	-10.73120
.75	1.73927	-.24116	-.71461	-4.82333
.80	2.14997	.12397	-.59063	2.47958
.85	1.94719	.45468	-.13595	9.09369
.90	1.07920	.63797	.50201	12.75946
.95	-.19126	.60548	1.10750	12.10978
1.00	-1.04285	.42837	1.53588	8.56749

APERTURA 0.50 SEG.

ANGULO INICIAL = .34000

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.48773	.04141	.38141	.82835
.10	.45145	.11809	.49950	2.36181
.15	.35148	.17778	.67729	3.55572
.20	.21319	.21399	.89128	4.27988
.25	.07161	.22615	1.11744	4.52315
.30	-.04177	.21906	1.33650	4.38125
.35	-.11078	.20024	1.53675	4.00495
.40	-.13582	.17718	1.71393	3.54360
.45	-.12678	.15564	1.86958	3.11294
.50	-.09487	.13953	2.00911	2.79067
.55	-.55655	.04501	2.05412	.90021
.60	-1.02402	-.12890	1.92522	-2.57814
.65	-1.13196	-.32115	1.60406	-6.42313
.70	-1.25886	-.53495	1.06910	-10.69915
.75	-1.00614	-.70583	.36326	-14.11677
.80	.06801	-.69428	-.33101	-13.88573
.85	1.46951	-.44470	-.77572	-8.89418
.90	2.24248	-.06385	-.83958	-1.27704
.95	2.33338	.33244	-.50713	6.64886
1.00	1.80049	.63823	.13109	12.76466

POÑER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

APERTURA : 0.60 SEG.

ANGULO INICIAL = .34000

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.48773	.04141	.38141	.82835
.10	.45145	.11809	.49950	2.36181
.15	.35148	.17778	.67729	3.55572
.20	.21319	.21399	.89128	4.27988
.25	.07161	.22615	1.11744	4.52315
.30	-.04177	.21906	1.33650	4.38125
.35	-.11078	.20024	1.53675	4.00495
.40	-.13582	.17718	1.71393	3.54360
.45	-.12678	.15564	1.86958	3.11294
.50	-.09487	.13953	2.00911	2.79067
.55	-.04784	.13140	2.14052	2.62815
.60	.01153	.13336	2.27389	2.66734
.65	-.34287	.07513	2.34902	1.50267
.70	-.66704	-.03815	2.31087	-.76309
.75	-.72113	-.16063	2.15024	-3.21261
.80	-.92373	-.31751	1.83272	-6.35031
.85	-1.18973	-.51957	1.31314	-10.39153
.90	-1.19200	-.72202	.59112	-14.44046
.95	-.34803	-.78113	-.19000	-15.62263
1.00	1.18906	-.57918	-.76919	-11.58370

POÑER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

APERTURA : 0.65 SEG.

ANGULO INICIAL = .34000

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.48773	.04141	.38141	.82835
.10	.45145	.11809	.49950	2.6181
.15	.35148	.17778	.67729	3.55572
.20	.21319	.21399	.89128	4.27988
.25	.07161	.22615	1.11744	4.52315
.30	-.04177	.21906	1.33650	4.38125
.35	-.11078	.20024	1.53675	4.00495
.40	-.13582	.17718	1.71393	3.54360
.45	-.12678	.15564	1.86958	3.11294
.50	-.09487	.13953	2.00911	2.79067
.55	-.04784	.13140	2.14052	2.62815
.60	.01153	.13336	2.27389	2.66734
.65	.08570	.14792	2.42181	2.95845
.70	-.18762	.11605	2.53787	2.32113
.75	-.36948	.05330	2.59117	1.06610
.80	-.27746	.00618	2.59735	.12362
.85	-.26659	-.03909	2.55826	-.78191
.90	-.33466	-.09593	2.46232	-1.91866
.95	-.49413	-.17985	2.28247	-3.59710
1.00	-.75997	-.30892	1.97354	-6.17852

POÑER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

APERTURA : 0.70 SEG.

ANGULO INICIAL = .34000

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.48773	.04141	.38141	.82835
.10	.45145	.11809	.49950	2.36181
.15	.35148	.17778	.67729	3.55572
.20	.21319	.21399	.89128	4.27988
.25	.07161	.22615	1.11744	4.52315
.30	-.04177	.21906	1.33650	4.38125
.35	-.11078	.20024	1.53675	4.00495
.40	-.13582	.17718	1.71393	3.54360
.45	-.12678	.15564	1.86958	3.11294
.50	-.09487	.13953	2.00911	2.79067
.55	-.04784	.13140	2.14052	2.62815
.60	.01153	.13336	2.27389	2.66734
.65	.08570	.14792	2.42181	2.95845
.70	.18273	.17895	2.60077	3.57914
.75	.02867	.18382	2.78460	3.67655
.80	.08011	.19743	2.98203	3.94870
.85	.47270	.27771	3.25975	5.55436
.90	1.04284	.45483	3.71458	9.09663
.95	1.91682	.78038	4.49496	15.60760
1.00	2.81150	1.25787	5.75284	25.15753

POÑER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

FALLA SOSTENIDA

ANGULO INICIAL = .34000

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANG	VEL. ANGULAR
.05	.48773	.04141	.38141	.82835
.10	.45145	.11809	.49990	.36181
.15	.35148	.17778	.67729	3.55572
.20	.21319	.21399	.89120	4.27988
.25	.07161	.22615	1.11744	4.52315
.30	-.04177	.21906	1.33650	4.38125
.35	-.11078	.20024	1.53675	4.00495
.40	-.13582	.17718	1.71393	3.54360
.45	-.12678	.15564	1.86958	3.11294
.50	-.09487	.13953	2.00911	2.79067
.55	-.04784	.13140	2.14052	2.62815
.60	.01153	.13336	2.27389	2.66734
.65	.08570	.14792	2.42181	2.95845
.70	.18273	.17895	2.60077	3.57914
.75	.31792	.23295	2.83372	4.65905
.80	.51625	.32063	3.15435	6.41264
.85	.81195	.45853	3.61288	9.17063
.90	1.22514	.66660	4.27949	13.33214
.95	1.64998	.94683	5.22633	18.93672
1.00	1.61539	1.22119	6.44752	24.42380

PONER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

APERTURA : 0.2 SEG.

ANGULO INICIAL = .55200

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.42199	.03583	.58783	.71669
.10	.39764	.10336	.69120	2.06738
.15	.32796	.5906	.85027	3.18139
.20	.22338	.19700	1.04728	3.94016
.25	-.24001	.15624	1.20352	3.12489
.30	-.80606	.01934	1.22287	.38689
.35	-.83286	-.12210	1.10076	-2.44212
.40	-.65983	-.23417	.86659	-4.68342
.45	-.31614	-.28786	.57872	-5.75728
.50	.09121	-.27237	.30635	-5.44745
.55	.44035	-.19758	.10877	-3.95167
.60	.67446	-.08303	.02573	-1.66068
.65	.77036	.04780	.07354	.95604
.70	.71524	.16927	.24281	3.38555
.75	.51695	.25707	.49989	5.14151
.80	.19609	.29038	.79027	5.80760
.85	-.20509	.25554	1.04582	5.11096
.90	-.57977	.15708	1.20290	3.14160
.95	-.80520	.02032	1.22323	.40654
1.00	-.83335	-.12120	1.10202	-2.42414

PONER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

APERTURA : 0.4 SEG.

ANGULO INICIAL = .55200

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.42199	.03583	.58783	.71669
.10	.39764	.10336	.69120	2.06738
.15	.32796	.15906	.85027	3.18139
.20	.22338	.19700	1.04728	3.94016
.25	.10188	.21431	1.26159	4.28623
.30	-.01302	.21209	1.47369	4.24198
.35	-.09951	.19519	1.66889	3.90396
.40	-.14644	.17032	1.83921	3.40653
.45	-.77515	.03867	1.87789	.77354
.50	-1.40069	-.19921	1.67868	-3.98424
.55	-1.32329	-.42395	1.25472	-8.47913
.60	-.87633	-.57279	.68193	-11.45582
.65	-.05084	-.58142	.10050	-11.62852
.70	.68404	-.46524	-.36474	-9.30499
.75	1.23146	-.25610	-.62084	-5.12202
.80	1.56611	.00988	-.61095	.19767
.85	1.55258	.27356	-.33738	5.47138
.90	1.19763	.47697	.13958	9.53943
.95	.63864	.58543	.72502	11.70873
1.00	-.11161	.56647	1.29149	11.32959

PONER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

APERTURA : 0.5 SEG.

ANGULO INICIAL = .55200

TMP.	POT. ACEL	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.42199	.03583	.58783	.71669
.10	.39764	.10336	.69120	2.06738
.15	.32796	.15906	.85027	3.18139
.20	.22338	.19700	1.04728	3.94016
.25	.10188	.21431	1.26159	4.28623
.30	-.01302	.21209	1.47369	4.24198
.35	-.09951	.19519	1.66889	3.90396
.40	-.14644	.17032	1.83921	3.40653
.45	-.15605	.14382	1.98304	2.87644
.50	-.13858	.12028	2.10332	2.40571
.55	-.72561	-.00295	2.10037	-.05900
.60	-1.34809	-.23190	1.86847	-4.63811
.65	-1.39952	-.46959	1.39887	-9.39193
.70	-1.06009	-.64964	.74923	-12.99281
.75	-.14611	-.67445	.07477	-13.48913
.80	.71381	-.55322	-.47844	-11.06448
.85	1.37592	-.31954	-.79798	-6.39081
.90	1.81624	-.01107	-.80906	-.22152
.95	1.83228	.30011	-.50895	6.00226
1.00	1.41578	.54056	.03161	10.81132

PONER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

APERTURA : 0.6 SEG.

ANGULO INICIAL = .55200

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.42199	.03583	.58783	.71669
.10	.39764	.10336	.69120	2.06738
.15	.32796	.15906	.85027	3.18139
.20	.22338	.19700	1.04728	3.94016
.25	.10188	.21431	1.26159	4.28623
.30	-.01302	.21209	1.47369	4.24198
.35	-.09951	.19519	1.66889	3.90396
.40	-.14644	.17032	1.83921	3.40653
.45	-.15605	.14382	1.98304	2.87644
.50	-.13858	.12028	2.10332	2.40571
.55	-.10490	.10246	2.20579	2.04937
.60	-.06229	.09188	2.29768	1.83778
.65	-.58953	-.00823	2.28944	-.16470
.70	-1.17598	-.20796	2.08148	-4.15922
.75	-1.35874	-.43872	1.64276	-8.77452
.80	-1.29846	-.65925	.98350	-13.18508
.85	-.48817	-.74216	.24134	-14.84329
.90	.51871	-.65406	-.41272	-13.08134
.95	1.29165	-.43469	-.84742	-8.69392
1.00	1.88810	-.11402	-.96144	-2.28052

PONER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

APERTURA : 0.65 SEG.

ANGULO INICIAL = .55200

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANG. LO	VEL. ANGULAR
.05	.42199	.03583	.58783	.71669
.10	.39764	.10336	.69120	2.06738
.15	.32796	.15906	.85027	3.18139
.20	.22338	.19700	1.04728	3.94016
.25	.10188	.21431	1.26159	4.28623
.30	-.01302	.21209	1.47369	4.24198
.35	-.09951	.19519	1.66889	3.90396
.40	-.14644	.17032	1.83921	3.40653
.45	-.15605	.14382	1.98304	2.87644
.50	-.13858	.12028	2.10332	2.40571
.55	-.10490	.10246	2.20579	2.04937
.60	-.06229	.09188	2.29768	1.83778
.65	-.01328	.08963	2.38731	1.79266
.70	-.49821	.00501	2.39233	.10035
.75	-1.03271	-.17037	2.22196	-3.40751
.80	-1.25109	-.38285	1.83910	-7.65716
.85	-1.39422	-.61964	1.21945	-12.39297
.90	-.82814	-.76029	.45915	-15.20597
.95	.24903	-.71800	-.25884	-14.36006
1.00	1.10222	-.53080	-.78965	-10.61608

PONER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

APERTURA : 0.70 SEG.

ANGULO INICIAL = .55200

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.42199	.03583	.58783	.71669
.10	.39764	.10336	.69120	2.06738
.15	.32796	.15906	.85027	3.18139
.20	.22338	.19700	1.04728	3.94016
.25	.10188	.21431	1.26159	4.28623
.30	-.01302	.21209	1.47369	4.24198
.35	-.09951	.19519	1.66889	3.90396
.40	-.14644	.17032	1.83921	3.40653
.45	-.15605	.14382	1.98304	2.87644
.50	-.13858	.12028	2.10332	2.40571
.55	-.10490	.10246	2.20579	2.04937
.60	-.06229	.09188	2.29768	1.83778
.65	-.01328	.08963	2.38731	1.79266
.70	.04406	.09711	2.48443	1.94233
.75	-.37988	.03259	2.51703	.65197
.80	-.81451	-.10573	2.41129	-2.11472
.85	-1.00261	-.27601	2.13528	-5.52033
.90	-1.32528	-.50110	1.63418	-10.02200
.95	-1.29209	-.72054	.91363	-14.41090
1.00	-.38522	-.78597	.12766	-15.71940

PONER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

FALLA SOSTENIDA

ANGULO INICIAL = 5200

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ULAR
.05	.42199	.03583	.58783	71669
.10	.39764	.10336	.69120	2.738
.15	.32796	.15906	.85027	3.18139
.20	.22338	.19700	1.04728	3.94016
.25	.10188	1431	1.26159	4.28623
.30	-.01302	.21209	1.47369	4.24198
.35	-.09951	.19519	1.66889	3.90396
.40	-.14644	.17032	1.83921	3.40653
.45	-.15605	14382	1.98304	2.87644
.50	-.13858	.12028	2.10332	2.40571
.55	-.10490	.10246	2.20579	2.04937
.60	-.06229	.09188	2.29768	1.83778
.65	-.01328	.08963	2.38731	1.79266
.70	.04406	.09711	2.48443	1.94233
.75	.11631	.11687	2.60130	2.33741
.80	.21609	.15357	2.75487	3.07141
.85	.36560	.21566	2.97054	4.31327
.90	.60149	.31782	3.28836	6.35640
.95	.97067	.48267	3.77103	9.65353
1.00	1.46124	.73085	4.50188	14.61700

POÑER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

ANGULO INICIAL = .31600

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.50900	.04322	.35922	.86448
.10	.47082	.12318	.48241	2.46374
.15	.36560	.18528	.66769	3.70561
.20	.22022	.22268	.89037	4.45366
.25	.07215	.23493	1.12531	4.69876
.30	-.04497	.22729	1.35261	4.54598
.35	-.11416	.20791	1.56052	4.15820
.40	-.13631	.18475	1.74528	3.69517
.45	-.67543	.07004	1.81532	1.40090
.50	-1.19871	-.13354	1.68178	-2.67082
.55	-1.24732	-.34538	1.33640	-6.90765
.60	-1.20367	-.54981	.78659	-10.99621
.65	-.65837	-.66162	.12496	-13.23255
.70	.54324	-.56936	-.44440	-11.38730
.75	1.68562	-.28308	-.72748	-5.66167
.80	2.16988	.08544	-.64204	1.70886
.85	2.03359	.43082	-.21121	8.61644
.90	1.23188	.64004	.42882	12.80082
.95	-.05654	.63043	1.05925	12.60874
1.00	-.99630	.46122	1.52048	9.22454

POÑER SWITCH Î EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

ANGULO INICIAL = .32600

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.52478	.04456	.37056	.89127
.10	.48556	.12703	.49759	2.54061
.15	.37772	.19118	.68877	3.82363
.20	.22951	.23016	.91893	4.60323
.25	.08029	.24379	1.16273	4.87595
.30	-.03482	.23788	1.40061	4.75767
.35	-.09817	.22120	1.62182	4.42419
.40	-.11040	.20244	1.82427	4.04890
.45	-.62564	.09618	1.92046	1.92374
.50	-1.11068	-.09244	1.82801	-1.84896
.55	-1.16756	-.29074	1.53726	-5.81489
.60	-1.23418	-.50035	1.03691	-10.00709
.65	-.94866	-.66147	.37544	-13.22946
.70	.06929	-.64970	-.27426	-12.99408
.75	1.38258	-.41489	-.68915	-8.29780
.80	2.13458	-.05235	-.74151	-1.04718
.85	2.21599	.32399	-.41751	6.47996
.90	1.65996	.60592	.18840	12.11844
.95	.43833	.68045	.86885	13.60904
1.00	-.74834	.55335	1.42221	11.06712

POÑER SWITCH Î EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

ANGULO INICIAL = .33600

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	V L. ANGULAR
.05	.54028	.04587	.38187	.91751
.10	.50006	.13080	.51268	2.61617
.15	.38970	.19699	.70968	3.93990
.20	.23888	.23756	.94724	4.75132
.25	.08886	.25265	1.19990	5.05316
.30	-.02368	.24863	1.44854	4.97271
.35	-.08036	.23498	1.68353	4.69973
.40	-.08140	.22116	1.90469	4.42321
.45	-.56642	.12496	2.02965	2.49920
.50	-.99790	-.04452	1.98513	-.69040
.55	-1.03667	-.22058	1.76454	-4.41173
.60	-1.17244	-.41971	1.34483	-8.39422
.65	-1.15862	-.61648	.72834	-12.32975
.70	-.52219	-.70517	.02316	-14.10352
.75	.80128	-.56908	-.54591	-11.38175
.80	1.91857	-.24324	-.78916	-4.86487
.85	2.31112	.14927	-.63989	2.98541
.90	2.07905	.50237	-.13752	10.04742
.95	1.13141	.69452	.55700	13.89053
1.00	-.24000	.65376	1.21077	13.07531

POÑER SWITCH Í EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

ANGULO INICIAL = .34600

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.55572	.04719	.39319	.94382
.10	.51452	.13457	.52776	2.69152
.15	.40172	.20280	.73057	4.05606
.20	.24844	.24499	.97556	4.89998
.25	.09795	.26163	1.23720	5.23269
.30	-.01146	.25968	1.49689	5.19374
.35	-.06052	.24940	1.74629	4.98815
.40	-.04870	.24113	1.98743	4.82272
.45	-.49673	.15677	2.14420	3.13543
.50	-.85723	.01118	2.15538	.22362
.55	-.84463	-.13226	2.02312	-2.64536
.60	-.97955	-.29863	1.72448	-5.97265
.65	-1.16243	-.49605	1.22842	-9.92115
.70	-1.06716	-.67730	.55112	-13.54603
.75	-.20543	-.71219	-.16106	-14.24384
.80	1.20363	-.50776	-.66883	-10.15539
.85	2.15062	-.14251	-.81134	-2.85027
.90	2.36722	.25952	-.55182	5.19056
.95	1.95320	.59125	.03943	11.82511
1.00	.79206	.72577	.76521	14.51554

POÑER SWITCH Í EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

ANGULO INICIAL = .35600

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.57111	.04849	.40449	.96995
.10	.52894	.13833	.54283	2.76664
.15	.41376	.20860	.75143	4.17211
.20	.25821	.25246	1.00389	5.04920
.25	.10757	.27072	1.27462	5.41459
.30	.00186	.27104	1.54567	5.42092
.35	-.03860	.26448	1.81016	5.28978
.40	-.01220	.26241	2.07257	5.24831
.45	-.41603	.19175	2.26433	3.83514
.50	-.68665	.07513	2.33947	1.50273
.55	-.58333	-.02393	2.31553	-.47870
.60	-.61718	-.12875	2.18677	-2.57512
.65	-.78392	-.26189	1.92488	-5.23790
.70	-1.03474	-.43763	1.48725	-8.75266
.75	-1.15535	-.63385	.85339	-12.67711
.80	-.65478	-.74506	.10833	-14.90124
.85	.67472	-.63046	-.52213	-12.60936
.90	1.92484	-.30355	-.82569	-6.07116
.95	2.41159	.10602	-.71967	2.12040
1.00	2.25528	.48905	-.23062	9.78101

POÑER SWITCH Í EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

ANGULO INICIAL = .36600

TMP.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
.05	.58644	.04979	.41579	.99599
.10	.54333	.14207	.55787	2.84154
.15	.42585	.21440	.77227	4.28805
.20	.26818	.25995	1.03222	5.19900
.25	.11773	.27994	1.31217	5.59890
.30	.01632	.28271	1.59489	5.65436
.35	-.01454	.28024	1.87514	5.60496
.40	.02821	.28504	2.16018	5.70081
.45	-.32386	.23003	2.39021	4.60073
.50	-.48469	.14771	2.53793	2.95435
.55	-.24782	.10562	2.64356	2.11256
.60	-.06250	.09501	2.73857	1.90026
.65	.11363	.11431	2.85288	2.28624
.70	.33504	.17121	3.02410	3.42431
.75	.68008	.28671	3.31082	5.73437
.80	1.26850	.50215	3.81298	10.04315
.85	2.20302	.87631	4.68929	17.52624
.90	2.98099	1.38259	6.07188	27.65191
.95	1.35358	1.61248	7.68437	32.24970
1.00	-1.10889	1.42415	9.10852	28.48308

POÑER SWITCH Í EN ON SI SE QUIERE REPETIR CALCULO CON OTRO ANGULO INICIAL

DAIOS DEL SISTEMA:

CENTRAL 1:

100 MVA ENTREGA 65 MW Y 33 MVAR

$$X'd_1 = 0.35 \text{ p.u.} \quad \text{BASE } 100 \text{ MVA}$$

$$E_1 = 1.02 \angle 0^\circ \text{ REFERENCIA}$$

$$M_1 = 0.01533 \text{ p.u.}$$

CENTRAL 2:

120 MVA ENTREGA 100 MW Y 47.7 MVAR

$$X'd_2 = 0.21 \text{ p.u.} \quad \text{BASE : } 120 \text{ MVA.}$$

$$E_2 = ?$$

$$M_2 = 0.03122 \text{ p.u.}$$

Si se toma como base general 100 MVA.

$$0.21 \times \frac{100}{120} = 0.175 \text{ p.u.}$$

RED:

<i>LINEA</i>	<i>G</i> <i>p.u.</i>	<i>B</i> <i>p.u.</i>
1 - 2	0.58823	-2.35294
1 - 4	0.39216	-1.56862
1 - 5	1.17647	-4.70588
2 - 3	1.17647	-4.70588
2 - 4	0.58823	-2.35294
3 - 5	1.17647	-4.70588

Las potencias entregadas en cada subestación son:

<i>SUBEST.</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>
3	0.6	0.3
4	0.4	0.1
5		0.2

PONER SWITCH 1 EN ON SI SE QUIERE TODOS LOS VALORES,
 O EN OFF SI SE QUIERE SOLO VALORES EN ESTACIONES GENERADORAS

BUS	P	Q	V1	V2
1	.64993	.32992	1.02000	0.00000
2	1.00000	.47690	1.03931	.03659
3	-.60000	-.30000	.95244	-.06538
4	-.40000	-.10000	.91440	-.12845
5	-.60000	-.20000	.99242	-.03575
PERDIDAS POTENCIA =	.04993			
PERDIDAS REACTIVA =		.20682		

Del programa de flujo de potencia sale (como se puede ver en los resultados):

$$\bar{E}_2 = 1.04 + j 0.0366$$

Las tensiones detrás de las reactancias transitorias serán:

$$\bar{E}'_A = E_1 + I_1 X'd_1 \quad \text{PERO} \quad I_1 = \frac{N_1}{\hat{E}_1}$$

$$\bar{E}'_A = E_1 + \frac{N_1}{\hat{E}_1} \cdot X'd_1$$

$$\bar{E}'_A = 1.02 + j 0.35 \left(\begin{array}{c} 0.65 - j0.33 \\ 1.02 \end{array} \right)$$

$$\bar{E}'_A = 1.133 + j 0.223 = 1.153 \angle 11.1^\circ$$

$$1.153 \angle 10.194 \text{ Radianes.}$$

$$\bar{E}'_B = E_2 + \frac{N_2}{\hat{E}_2} X'd_1$$

$$\bar{E}'_B = 1.04 + j 0.0366 + j 0.175 \left(\begin{array}{c} 1.0 - j0.477 \\ 1.04 - j0.0366 \end{array} \right)$$

$$\bar{E}'_B = 1.138 \angle 10.19 \text{ Radianes.}$$

Con lo cual obtenemos los valores iniciales para entrar al programa de las curvas de oscilación.

MAQ.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
TIEMPO = 100 SEG				
1	.40995	.13371	.32771	1.33710
2	.45446	.07278	.26278	.72784
TIEMPO = 200 SEG.				
1	.42422	.41043	.73814	4.10436
2	.43641	.21257	.47535	2.12571
TIEMPO = 300 SEG.				
1	.47225	.71849	1.45664	7.18494
2	.38180	.33486	.81022	3.34865
TIEMPO = 400 SEG.				
1	.56696	1.08833	2.54497	10.88334
2	.29958	.43082	1.24104	4.30826
TIEMPO = 500 SEG.				
2	.70033	1.54517	4.03015	15.45173
	.25710	.51317	1.75422	5.13178
TIEMPO = 600 SEG.				
	.64611	1.96664	6.05579	19.66642
	.55491	.69092	2.44514	6.90920
TIEMPO = 700 SEG.				
1	.22646	2.11437	8.17116	21.14372
2	1.22774	1.08417	3.52932	10.84175
TIEMPO = 800 SEG.				
1	-.20178	1.98274	10.15391	13.82745
2	1.14718	1.45162	4.98094	14.51627
TIEMPO = 900 SEG.				
1	-.32222	1.77255	11.92646	17.72556
2	.91082	1.74337	6.72432	17.43371

TIEMPO = 1.000 SEG.

1 - .32554
2 .89546

13.48666
8.75451

15.60201
20.30194

MAQ.	POT. ACEL.	DELT. ANGULO	ANGULO	VEL. ANGULAR
TIEMPO = .100 SEG.				
1	.65001 .51020	.21200 .08171	.40600 .27171	2.12006 .81710
TIEMPO = .200 SEG.				
1	.65001 .51020	.63601 .24513	1.04202 .51684	6.36018 2.45131
TIEMPO = .300 SEG.				
1	.65001 .51020	1.06003 .40855	2.10205 .92539	10.60031 4.08552
TIEMPO = .400 SEG.				
1	.65001 .51020	1.48404 .57197	3.58609 1.49736	14.84043 5.71973
TIEMPO = .500 SEG.				
1 2	.65001 .51020	1.90805 .73539	5.49415 2.23276	19.08055 7.35394
TIEMPO = .600 SEG.				
1	.50914 .81812	2.24018 .99744	7.73433 3.23020	22.40182 9.97446
TIEMPO = .700 SEG.				
1 2	-.15452 1.19043	2.13938 1.37875	9.87372 4.50896	21.39382 13.78751
TIEMPO = .800 SEG.				
1 2	-.33140 .86197	1.92320 1.65484	11.79692 6.26380	19.23200 16.54847
TIEMPO = .900 SEG.				
1	-.33678 .71302	1.70351 1.88323	13.50043 8.14704	17.03511 18.83234

TIEMPO = 1.000 SEG.

1 - .33674
2 .81352

1.48384
2.14381

14.83846
21.43812

Se ve claramente de las curvas de resultados que en el caso de existir una falla asimétrica, las amplitudes de las oscilaciones son mayores que en el caso en que el c. c. son trifásico, esto ya se vió que debía ser así cuando se mencionó el efecto de las fallas en estabilidad.

Se pasará ahora al tercer y último ejemplo.

TERCER EJEMPLO.-

Se desean trazar las curvas de oscilación de un sistema con 3 máquinas para dos tiempos de la línea fallada a) para 0.35 seg. b) Para 0.40 seg.

EL SISTEMA ES EL SIGUIENTE:

Donde la x señala el punto donde sucede un c.c. trifásico

CENTRALES:

Número de Unidades	MVA	$X'd$ p.u.	H	MW	E p.u.
3	35	0.35	3.0	80	1.05
4	75	0.21	7.0	230	1.00
2	50	0.18	8.0	90	1.00

LÍNEA	G (p.u.)	B (p.u.)
1-4	0.0	- 6.66
2-5	0.0	- 16.68
2-7	0.0	- 40.0
3-5	0.0	- 6.25
3-6	0.0	- 10.0
3-7	0.0	- 40.0
4-5	0.0	- 11.1
4-6	0.0	- 10.0
5-7	0.0	- 20.0
6-7	0.0	- 5.0

Las reactancias transitorias en una base común de 100 MVA resulta:

$$X'd_1 = 0.35 \times \frac{100}{3 \times 35} = 0.333 \text{ p.u.}$$

$$X'd_2 = 0.21 \times \frac{100}{4 \times 75} = 0.07 \text{ p.u.}$$

$$X'd_3 = 0.18 \times \frac{100}{2 \times 50} = 0.18 \text{ p.u.}$$

Del programa de flujo de potencia sale que los valores de las tensiones detrás de las reactancias transitorias son:

$$\begin{aligned}\bar{E}'_1 &= 1.17 \angle 23^\circ = 1.17 \angle 0.4 \text{ Radianes.} \\ \bar{E}'_2 &= 1.01 \angle 10.4^\circ = 1.01 \angle 0.18 \text{ Radianes.} \\ \bar{E}'_3 &= 1.00 \angle 1.5^\circ = 1.00 \angle 0.166 \text{ Radianes.}\end{aligned}$$

Potencias iniciales de entrada con base de 100

Dá:

$$\begin{aligned}P_1 &= 0.8 \text{ p.u.} \\ P_2 &= 2.3 \text{ p.u.} \\ P_4 &= 0.9 \text{ p.u.}\end{aligned}$$

El programa señala que el sistema es estable si se realiza la apertura a 0.35 e inestable si se realiza a 0.4 seg. también se puede ver de las curvas que las máquinas 2 y 3 oscilan casi juntas.

Con los tres ejemplos dados se ha podido ver la flexibilidad de los programas para manejar gran variedad de problemas con bastante facilidad, ahorro de tiempo y exactitud.

1	.73862	.22074	.62174	2.20747
2	2.03356	.09151	.27251	.91519
3	.80591	.09490	.26090	.94903

TIEMPO = .200 SEG.

1	.71432	.64772	1.26946	6.47720
2	2.04882	.27593	.54845	2.75932
3	.81604	.28709	.54799	2.87095

TIEMPO = .300 SEG.

1	.65350	1.03833	2.30780	10.38337
2	2.09048	.46409	1.01254	4.64095
3	.84084	.48512	1.03312	4.85127

TIEMPO = .400 SEG.

1	.59974	1.39682	3.70462	13.96820
2	2.13969	.65668	1.66923	6.56686
3	.85963	.68758	1.72071	6.87586

TIEMPO = .500 SEG.

1	.07062	1.35460	5.05922	13.54603
2	1.80091	.81878	2.48801	8.18785
3	.57838	.82380	2.54451	8.23805

TIEMPO = .600 SEG.

1	.02372	1.36878	6.42801	13.68784
2	1.09835	.91764	3.40566	9.17647
3	.15768	.86094	3.40546	8.60942

TIEMPO = .700 SEG.

1	.89215	1.90205	8.33006	19.02052
2	.42162	.95559	4.36126	9.55597
3	.07820	.87936	4.28482	8.79360

TIEMPO = .800 SEG.

1	2.39469	3.33342	11.66349	33.33428
2	.98299	.86711	5.22838	8.67119
3	.25292	.81979	5.10461	8.19793

TIEMPO = .900 SEG.

1	.06165	3.37027	15.03377
2	-.38800	.83219	6.06057
3	.32807	.89705	6.00167

TIEMPO = 1.000 SEG.

1	.30137	3.55042	18.58419	35.50420
2	.63077	.88897	6.94954	8.88970
3	.40141	.99159	6.99327	9.91598

MAQ.	POT ACEL			VEL ANGULAR
TIEMPO = .050 SEG.				
1	.73862	.05518	.45618	1.10373
2	.33356	.02287	.20387	.45759
3	.80591	.02372	.18972	.47451
TIEMPO = .100 SEG.				
1	.73243	.16463	.62082	3.29273
2	.03740	.06872	.27260	1.37452
	.80848	.07132	.26105	1.42657
TIEMPO = .150 SEG.				
1	.71451	.27140	.89223	5.42817
2	.04876	.11482	.38743	2.29656
	.81589	.11936	.38042	2.38735
TIEMPO = .200 SEG.				
1	.68698	.37406	1.26629	7.48133
2	.06694	.16133	.54877	3.22678
3	.82719	.16807	.54849	3.36144
TIEMPO = .250 SEG.				
1	.65401	.47179	1.73809	9.43595
2	.09031	.20837	.75714	4.16751
	.84043	.21755	.76605	4.35112
TIEMPO = .300 SEG.				
1	.62215	.56476	2.30286	11.29536
2	.11594	.25598	1.01313	5.11978
	.85252	.26775	1.03380	5.35503
TIEMPO = .350 SEG.				
1	.59998	.65442	2.95729	13.08850
2	.13955	.30413	1.31727	6.08268
	.85938	.31835	1.35215	6.36702
TIEMPO = .400 SEG.				
1	.24026	.61852	3.57581	12.37043
2	.79400	.34450	1.66177	6.89006
3	.61558	.35459	1.70674	7.09192

TIEMPO = .450 SEG.

1	- .88629	.48608	4.06189
2	1.45624	.37727	2.03904
3	.34804	.37508	2.08183

TIEMPO = .500 SEG.

1	- .77396	.37042	4.43231	7.40850
2	1.41992	.40922	2.44827	8.18447
3	.34391	.39533	2.47717	7.90676

TIEMPO = .550 SEG.

1	- .81157	.24914	4.68146	4.98299
2	1.38994	.44050	2.88877	8.81001
3	.38854	.41821	2.89539	8.36430

TIEMPO = .600 SEG.

2	- .97924	.10281	4.78428	2.05638
3	1.35469	.47098	3.35975	9.41968
	.46656	.44568	3.34107	8.91372

TIEMPO = .650 SEG.

1	-1.13274	-.06644	4.71783	-1.32898
2	1.20678	.49813	3.85789	9.96279
3	.51403	.47595	3.81702	9.51903

TIEMPO = .700 SEG.

1	- .89344	-.19995	4.51787	-3.99917
2	.71880	.51431	4.37221	10.28628
3	.40679	.49990	4.31693	9.99806

TIEMPO = .750 SEG.

1	.10933	-.18362	4.33425	-3.67240
2	-.19412	.50994	4.88215	10.19892
3	.07385	.50425	4.82118	10.08503

TIEMPO = .800 SEG.

1	1.39463	.02478	.35904	.9567
2	-1.03419	.48667	5.36883	9.73349
3	-.28334	.48756	5.30875	9.75137

C O N C L U S I O N E S

- 1.- Para los casos de estabilidad transitoria se puede representar a la maquina síncrona por una reactancia transitoria en serie con una fuente de tensión interna de valor constante, siendo ésta la tensión detrás de la reactancia ~~transitoria~~ transitoria.
- 2.- La potencia de amortiguación no se ha tomado en cuenta debido a que es muy pequeña en comparación con la potencia síncrona, de su dependencia del deslizamiento se concluye su magnitud despreciable.
- 3.- No se considera la acción del regulador de velocidad, pues depende de la variación de la velocidad que es casi despreciable por lo menos en el primer periodo de oscilación que es el que determina la estabilidad o no de un sistema en el caso transitorio.
- 4.- La utilización de medios automáticos de cálculo ahorra considerablemente el tiempo empleado en resolver los problemas de estabilidad transitoria; aumenta considerablemente la exactitud de los resultados y elimina por completo los errores en los cálculos numéricos.
- 5.- La solución de problemas de problemas de estabilidad para un número considerable de estaciones generadoras, antes imposibles de resolver, son ahora factibles con el uso de las calculadoras digitales.
- 6.- La facilidad que proporcionan los programas para poder variar la totalidad de factores que afectan la estabilidad

hace posible el diseño más adecuado para un sistema de potencia, en lo que se refiere a su marcha en sincronismo.

- 7.- El hecho de poder simular un sistema de potencia hace posible la investigación tanto teórica como práctica del comportamiento de los sistemas de potencia en problemas de estabilidad, sin las dificultades de cálculo que se tenía antes.
- 8.- En lo que se refiere específicamente a la estabilidad transitoria, se ha visto en los ejemplos desarrollados, que no se incurre en grave error al despreciar la saliencia de la máquina. Que un corto circuito trifásico es más grave que uno asimétrico desde el punto de vista de la estabilidad. Finalmente que un conjunto de máquinas que oscilen casi simultáneamente se pueden reemplazar por una sola máquina equivalente.
- 9.- Como última conclusión quisiera señalar la necesidad actual de difundir el uso de sistemas de computación automáticos en los problemas de ingeniería eléctrica, tratando de incluir en los cursos de sistemas de potencia, protección y estabilidad, los métodos matemáticos y criterios adecuados para estructurar programas con el propósito de resolver cualquier problema de análisis o diseño. Es también urgente el incluir en los programas de máquinas eléctricas la teoría moderna de máquinas, con el propósito de proveer a los jóvenes profesionales las armas adecuadas para hacer frente, sino en la actualidad, si en un futuro próximo, a la demanda de un personal técnico altamente capacitado para el progreso del país, en un mundo rápidamente cambiante.

- 1.- ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERSIONS WHITE AND WOODSON.
JOHN WYLEI.
- 2.- "ELECTRIC MACHINERY" by Fitzgerald.
- 3.- "MATHEMATICS OF MODERN ENGINEERING" by Keller Vol. II.
- 4.- "ELECTRIC MACHINES" by Langdorf.
- 5.- POWER SYSTEMS STABILITY
Tomo 1 y 3
Kimbard: 1964 John Hyley
- 6.- ELEMENTOS OF POWER SYSTEM ANALYSIS
Mc. Graw HI 1. Stevenson
- 7.- MARCHA EN PARALELO DE CENTRALES ELECTRICAS.
Tesis de Grado Crocci 1950.
- 8.- ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTOR PREFERENCE BOOK WESTING-
HOUSE MANUFACTURING COMPANY.
- 9.- GENERAL ELECTRIC NETWORKS.
Analyzer.- Reference Manual.
- 10.- Edith Clarke "CIRCUIT ANALYSIS" of A-C Power Systems.- John Wiley.

TRANSACCION AIEE

- 1.- FIRST REPORT OF POWER SYSTEM STABILITY TRANS. Vol. 56 Feb, 1937.
- 2.- SYSTEM STABILITY AS A DESIGN. PROBLEM R.H. Park y E.M. Bencker
Trans. Vol. 48 - 1929.
- 3.- PROGRESS IN THE STUDY OF SYSTEM STABILITY.- H. Mc. Clure
Trans. Vol. 49, 1930.
- 4.- LONGLEY, THE CALCULATION OF ALTEONATOR SWING CURVES.
Trans. Vol. 49 - 1930.

- 5.- THE SOLUTION OF STABILITY PROBLEMS BY
Trans. Volt. 75 1956. John Sony Ward.
- 6.- TRANSIENT STABILITY STUDIES. Part. I, II, III. Part III Vol. 78
1959. Long y Bierly.
- 7.- A NEW DIGITAL TRANSIENT STABILITY. Programa Vol. 78 1959.
Byrfaczy Lewis.
- 8.- A DIGITAL TRANSIENT STABILITY PROGRAM INCLUDING THE EFFECTS, OF
REGULATOR. excited and gobermor response, Vol. 79. 1960.